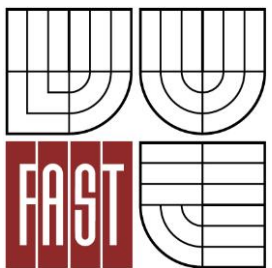




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ S FRP VÝZTUŽÍ

DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES WITH FRP REINFORCEMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ JANUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. Ing. PETR ŠTĚPÁNEK, CSc.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3608T001 Pozemní stavby |
| Pracoviště | Ústav betonových a zděných konstrukcí |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|--|--------------------------------------|
| Diplomant | Bc. Ondřej Januš |
| Název | Navrhování konstrukcí s FRP výztuží |
| Vedoucí diplomové práce | prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc. |
| Datum zadání diplomové práce | 31. 3. 2015 |
| Datum odevzdání diplomové práce | 15. 1. 2016 |
| V Brně dne 31. 3. 2015 | |

.....
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

CNR-DT 203/2006: Guide for the design and Construction of Concrete Structures reinforced with FRP Bars

ISIS Canada Reinforcing Concrete Structures with FRP, 2007

ACI 440.1R03, Guide for the design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars

EC 2

fib Model Code 2010

Zásady pro vypracování

Zpracujte

1) přehled teorie a porovnání navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží dle předpisů ACI, CNR Rome, ISIS Canada a EC2 pro

- mezní stav únosnosti při namáhání osovou silou N a ohybovým momentem M ,

- posouvající silou

2) interakční diagram průřezu pro namáhání N , M a porovnejte rozdíly dle jednotlivých předpisů

3) pro fragment konstrukce dle zadání vedoucího práce zpracujte statický výpočet a výkresovou dokumentaci

Struktura a přílohy DP:

A) Textová část

B) Přílohy textové části

B1) Použité podklady

B2) Statický výpočet

B3) Výkresová dokumentace

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).

Popisný soubor závěrečné práce (1x).

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě podle směrnic a 1x na CD.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou návrhu konstrukcí s FRP výztuží. Je zde zpracován postup návrhu průřezu s FRP výztuží namáhaného ohybovým momentem a posouvající silou na mezní stav únosnosti podle daných norem a směrnic. Při tom jsou zohledňovány dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti. Dále se porovnávají únosnosti průřezu namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu, které byly vypočteny podle zmíněných norem. V další části práce je proveden návrh konstrukce (prefabrikovaná vrátnice) ve variantách s FRP výztuží a ocelovou výztuží s obyčejným a lehkým betonem.

Klíčová slova

nekovová výztuž, FRP, ohyb, normálová síla, posouvající síla, interakční diagram, zatížení, trvanlivost, dotvarování, přetržení, únava, lehký beton, prefabrikovaný dílec, vrátnice

Abstract

The diploma thesis presents design of construction with FRP reinforcement. Including design process of cross-section with FRP reinforcement exposed to bending moment and shear force at ultimate limit state according to given standards and guidelines. Long term physical and mechanical properties of FRPs are taken into account. There are also compared load capacities of cross-section exposed to combination of bending moment and axial force, which were designed according to mentioned standards. In another part of diploma thesis there is a design of construction (precast gatehouse) with FRP reinforcement and steel reinforcement with ordinary and lightweight concrete.

Keywords

non-metallic reinforcement, FRP, flexure, axial force, shear force, interaction diagram, load, durability, creep, rupture, fatigue, lightweight concrete, precast element, gatehouse

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Ondřej Januš *Navrhování konstrukcí s FRP výztuží*. Brno, 2016. 158 s., 662 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových
a zděných konstrukcí. Vedoucí práce prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.1.2016

.....
podpis autora
Bc. Ondřej Januš

Poděkování:

Rád bych poděkoval zejména panu prof. RNDr. Ing. Petru Štěpánkovi, CSc. za velkou ochotu, cenné rady a vstřícnost.

Mé vřelé díky patří i Ing. Františku Girglemu, PhD., který si našel čas a ochotně zodpověděl každý můj dotaz.

Neobešel bych se ani bez kýžené pomoci Ing. Petry Rozehnalové a tímto bych jí chtěl také poděkovat.

Samozřejmě nesmím zapomenout ani na své nejbližší, kteří mě během práce neustále podporovali a utužovali mě v mém entusiasmu. Děkuji!

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1 Úvod | 14 |
| 2 Přehled teorie navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží | 15 |
| 2.1 Průřez namáhaný ohybovým momentem | 15 |
| 2.1.1. ACI 440.1R-06 | 15 |
| 2.1.1.1 Základní předpoklady návrhu | 15 |
| 2.1.1.2 Návrh a posouzení ohýbaného prvku | 16 |
| 2.1.1.2.1 Filozofie návrhu ohýbaných prvků | 17 |
| 2.1.1.2.2 Moment únosnosti | 17 |
| 2.1.1.2.3 Způsoby porušení prvku | 17 |
| 2.1.1.2.4 Stanovení momentu únosnosti | 19 |
| 2.1.1.2.5 Redukční faktor ohybové únosnosti | 22 |
| 2.1.1.2.6 Minimální plocha výztuže | 23 |
| 2.1.1.3 Další ustanovení | 24 |
| 2.1.1.3.1 Více vrstev výztuže a kombinace různých druhů výztuže | 24 |
| 2.1.1.3.2 Redistribuce momentů | 24 |
| 2.1.1.3.3 Tlačená výztuž | 24 |
| 2.1.2 ISIS Canada Design Manual 2007 | 25 |
| 2.1.2.1 Základní předpoklady návrhu | 25 |
| 2.1.2.2 Kompatibilita přetvoření | 25 |
| 2.1.2.3 Druhy porušení | 25 |
| 2.1.2.3.1 Balanční způsob porušení | 26 |
| 2.1.2.3.2 Porušení způsobené drcením betonu | 28 |
| 2.1.2.3.3 Porušení způsobené přetržením výztuže | 30 |
| 2.1.2.4 Moment na mezi vzniku trhlin | 32 |
| 2.1.2.5 Minimální ohybová únosnost | 33 |
| 2.1.2.6 Doplnující podmínka pro tahové porušení | 33 |
| 2.1.2.7 Prvky vyztužené více vrstvami FRP výztuže | 33 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2.8 Prvky s tlačnou výztuží | 34 |
| 2.1.2.9 Nosníky s více druhy výztuže | 34 |
| 2.1.3 CNR-DT 203/2006 | 34 |
| 2.1.3.1 Předpoklady návrhu | 34 |
| 2.1.3.2 Ohybová únosnost prvku | 35 |
| 2.1.3.3 Minimální plocha výztuže | 37 |
| 2.1.4 fib Bulletin No. 40 | 37 |
| 2.1.4.1 Vlastnosti průřezu | 37 |
| 2.1.4.2 Chování prvku vyztuženého FRP výztuží při ohybu | 37 |
| 2.1.4.3 Množství podélné výztuže pro balanční porušení | 38 |
| 2.1.4.4 Stanovení momentu únosnosti | 38 |
| 2.1.4.5 Působení FRP výztuží v tlaku | 42 |
| 2.1.4.6 Působení FRP výztuží v tahu | 42 |
| 2.1.5 Numerický příklad na výpočet krátkodobé únosnosti prvku při prostém ohybu | 43 |
| 2.1.5.1 Materiálové charakteristiky | 43 |
| 2.1.5.1.1 GFRP výztuž | 43 |
| 2.1.5.1.2 Beton | 43 |
| 2.1.5.2 Průřezové charakteristiky | 43 |
| 2.1.5.3 Výpočet momentu na mezi únosnosti dle ACI 440.1R-06 | 44 |
| 2.1.5.4 Výpočet momentu na mezi únosnosti dle ISIS Canada | 45 |
| 2.1.5.5 Výpočet momentu na mezi únosnosti dle CNR-DT 203/2006 | 46 |
| 2.1.5.6 Výpočet momentu na mezi únosnosti dle fib Bulletin No. 40 | 47 |
| 2.2 Průřez namáhaný posouvající silou | 49 |
| 2.2.1 Vliv mechanických vlastností FRP výztuží na místní přenos smykového namáhání | 49 |
| 2.2.1.1 Přenos smykového napětí tlačnou částí průřezu | 49 |
| 2.2.1.2 Hmoždinkový účinek zrn kameniva | 50 |
| 2.1.2.3 Hmoždinkový účinek výztuže | 51 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2.4 Smyková výztuž | 51 |
| 2.2.2 Způsoby smykového porušení prvků s FRP výztuží | 52 |
| 2.2.3 Přístupy k návrhu prvků při smykovém namáhání | 52 |
| 2.2.4 Podstata návrhu | 53 |
| 2.2.5 Smyková únosnost trémových prvků s FRP výztuží | 54 |
| 2.2.5.1 Návrhový postup dle ACI 440.1R-06 | 54 |
| 2.2.5.1.1 Stanovení smykové únosnosti | 54 |
| 2.2.5.1.2 Minimální plocha smykové výztuže | 57 |
| 2.2.5.1.3 Konstrukční zásady | 57 |
| 2.2.5.2 Návrhový postup dle ISIS Canada | 58 |
| 2.2.5.2.1 Stanovení smykové únosnosti | 58 |
| 2.2.5.2.2 Smyková únosnost FRP třmínků | 60 |
| 2.2.5.2.3 Smyková únosnost betonu | 61 |
| 2.2.5.2.4 Minimální plocha smykové výztuže | 62 |
| 2.2.5.2.5 Maximální vzdálenost FRP třmínků | 62 |
| 2.2.5.3 Návrhový postup dle CNR-DT 203/2006 | 63 |
| 2.2.5.3.1 Stanovení smykové únosnosti | 63 |
| 2.2.5.3.2 Prvky bez smykové výztuže | 63 |
| 2.2.5.3.3 Prvky se smykovou výztuží | 64 |
| 2.2.5.3.4 Minimální plocha smykové výztuže | 64 |
| 2.2.5.3.5 Konstrukční zásady pro příčnou výztuž | 65 |
| 2.2.5.4 Návrhový postup dle fib Bulletin No. 40 | 65 |
| 2.2.5.5 Protlačení lokálně podepření stropní desky dle ACI 440.1R-06 | 65 |
| 2.2.6 Numerický příklad na výpočet smykové únosnosti prvku | 67 |
| 2.2.6.1 Materiálové charakteristiky | 67 |
| 2.2.6.1.1 Podélná výztuž | 67 |
| 2.2.6.1.2 Příčná výztuž | 67 |
| 2.2.6.1.3 Beton | 67 |

| | |
|---|----|
| 2.2.6.2 Průřezové charakteristiky | 67 |
| 2.2.6.3 Statické schéma | 68 |
| 2.2.6.4 Zatížení | 68 |
| 2.2.6.5 Výpočet únosnosti ve smyku dle ACI 440.1R-06 | 69 |
| 2.2.6.6 Výpočet únosnosti ve smyku dle ISIS Canada | 71 |
| 2.2.6.7 Výpočet únosnosti ve smyku dle CNR-DT 203/2006 | 73 |
| 2.3 Dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti | 76 |
| 2.3.1 Faktory nejvíce ovlivňující dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti .. | 76 |
| 2.3.1.1 Dotvarování a přetržení výztuže od dotvarování (creepové porušení) . | 76 |
| 2.3.1.2 Únava a cyklické zatěžování | 77 |
| 2.3.1.3 Účinek vysokých teplot a ohně | 77 |
| 2.3.1.4 Ultrafialové záření | 77 |
| 2.3.1.5 Zásadité prostředí | 78 |
| 2.3.1.6 Výkyvy teplot | 78 |
| 2.3.1.7 Působení vody | 78 |
| 2.3.1.8 Působení chloridů | 79 |
| 2.3.1.9 Karbonatace betonu | 79 |
| 2.3.1.10 Působení kyselin | 79 |
| 2.3.2 Zohlednění dlouhodobých účinků při návrhu | 79 |
| 2.3.2.1 Zohlednění dlouhodobých účinků dle ACI 440.1R-06 | 79 |
| 2.3.2.1.1 Dotvarování | 80 |
| 2.3.2.1.2 Únava | 81 |
| 2.3.2.2 Zohlednění dlouhodobých účinků dle ISIS Canada | 81 |
| 2.3.2.3 Zohlednění dlouhodobých účinků dle CNR-DT 203/2006 | 81 |
| 2.3.2.4 Zohlednění dlouhodobých účinků dle fib Bulletin No. 40 | 82 |
| 2.4 Zatížení konstrukcí | 84 |
| 2.4.1 ASCE/SEI 7-10 | 84 |
| 2.4.2 NBCC 2010 | 85 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.3 EN 1990-1 | 85 |
| 2.4.3.1 Kombinace 6.10..... | 85 |
| 2.4.3.2 Kombinace 6.10a a 6.10b | 85 |
| 3 Konstrukce interakčního diagramu | 87 |
| 3.1 Analýza významných průběhů přetvoření průřezu | 87 |
| 3.1.1 Přetvoření odpovídající poloze 1..... | 87 |
| 3.1.2 Přetvoření odpovídající poloze 2..... | 89 |
| 3.1.3 Přetvoření odpovídající poloze 3..... | 92 |
| 3.1.4 Přetvoření odpovídající poloze 4..... | 92 |
| 3.1.5 Přetvoření odpovídající poloze 5..... | 93 |
| 3.1.6 Přetvoření odpovídající poloze 6..... | 93 |
| 3.1.7 Přetvoření odpovídající poloze 7..... | 94 |
| 3.2 Výpočet bodů interakčního diagramu dle CNR-DT a fib Bulletin No.40 | 94 |
| 3.2.1 Omezení únosnosti tlačného prvku dle EC2..... | 95 |
| 3.3 Výpočet bodů interakčního diagramu dle ACI 440.1R-06 | 95 |
| 3.3.1 Omezení únosnosti tlačného prvku dle ACI 318-05 | 97 |
| 3.4 Výpočet bodů interakčního diagramu dle ISIS Canada | 98 |
| 3.4.1 Omezení únosnosti tlačného prvku dle CSA A23.3-04..... | 99 |
| 3.5 Interakční diagram průřezu pro namáhání N+M..... | 100 |
| 3.5.1 Materiálové charakteristiky | 100 |
| 3.5.2 Průřezové charakteristiky | 100 |
| 3.5.3 Interakční diagram dle ACI 440.1R-06 | 101 |
| 3.5.3.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže | 101 |
| 3.5.3.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro horní vrstvu výztuže .. | 106 |
| 3.5.3.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže | 106 |
| 3.5.3.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže | 110 |
| 3.5.4 Interakční diagram dle ISIS Canada..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| 3.5.4.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže | 112 |
| 3.5.4.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro horní vrstvu výztuže .. | 115 |
| 3.5.4.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže | 115 |
| 3.5.4.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže | 119 |
| 3.5.5 Interakční diagram dle CNR-DT 203/2006..... | 120 |
| 3.5.5.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže | 120 |
| 3.5.5.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro horní vrstvu výztuže .. | 125 |
| 3.5.5.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže | 125 |
| 3.5.5.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže | 129 |
| 3.5.6 Interakční diagram dle fib Bulletin No. 40..... | 130 |
| 3.5.6.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže | 130 |
| 3.5.6.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro horní vrstvu výztuže .. | 135 |
| 3.5.6.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže | 135 |
| 3.5.6.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže | 139 |
| 3.5.7 Tvar křivky interakčního diagramu při přechodu z oblasti tahového porušení na tlakové porušení | 140 |
| 3.5.7.1 Vektor u_1 odpovídající tahovému porušení | 141 |
| 3.5.7.2 Vektor u_2 odpovídající tlakovému porušení | 142 |
| 3.5.7.3 Vektor u_3 | 143 |
| 3.5.7.4 Vyhodnocení provedených výpočtů | 143 |
| 3.5.8 Porovnání interakčních diagramů vytvořených dle jednotlivých předpisů | 145 |
| 3.5.8.1 Určení zatížení při posuzování průřezu proti creepovému porušení .. | 147 |
| 3.5.8.2 Numerické srovnání interakčních diagramů..... | 147 |
| 3.5.8.3 Vyhodnocení numerického srovnání interakčních diagramů | 150 |

Kapitola 1

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou návrhu konstrukcí s nekovovou kompozitní výztuží (FRP výztuž). Dle zadání diplomové práce je zpracován postup návrhu průřezu s FRP výztuží namáhaného ohybovým momentem a posouvající silou na mezní stav únosnosti podle následujících norem a směrnic:

- ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [1],
- ISIS Canada - Reinforcing Concrete Structures with FRP, 2007 [2],
- CNR-DT 203/2006: Guide for the design and Construction of Concrete Structures reinforced with FRP Bars [3],
- fib Bulletin No. 40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4].

Dále se práce zabývá faktory, které ovlivňují dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti FRP výztuže, a jejich zohledňováním při návrhu.

Rovněž bylo nutné se zabývat způsobem výpočtu zatížení ve státech, jejichž normy byly v práci uvažovány. Teprve pak bylo možné porovnat únosnosti průřezu namáhaného kombinací normálové síly a ohybového momentu zobrazené formou interakčních diagramů. Únosnosti byly vypočteny podle zmíněných norem.

Na základě znalostí nabytých při zpracovávání teoretické části, jsem mohl v další části práce navrhnout konstrukci s FRP výztuží. Jednalo se o prefabrikovanou vrátnici skládající se ze čtyř dílů. Tato konstrukce byla vypracována ve variantách s obyčejným i lehkým betonem. Každá varianta byla navržena jednak s FRP výztuží a jednak s klasickou ocelovou výztuží, aby bylo porovnáno množství použitého materiálu u jednotlivých variant.

Symbody, použité v následujícím textu, odpovídají předpisům, ze kterých se přepisuje.

Kapitola 2

Přehled teorie navrhování betonových konstrukcí s FRP výztuží

Cílem této kapitoly je vytvořit přehled teorie dle zadaných směrnic a předpisů. V první části je shrnut postup výpočtu únosnosti při namáhání prostým ohybem. Následuje výpočet únosnosti prvku namáhaného posouvající silou.

Jelikož byla vyzorována degradace FRP výztuží v čase vlivem okolních vlivů a některých způsobů zatěžování, je v další části této kapitoly shrnut způsob zohlednění degradace dlouhodobých vlastností FRP výztuží při výpočtu únosnosti.

Aby bylo možné porovnat únosnosti průřezu vypočtených dle jednotlivých předpisů, je nutné je určovat v návaznosti na normy zatížení, na které se příslušné předpisy váží. Tyto normy na zatížení jsou shrnuty v závěru této kapitoly.

Na kapitolu 2 navazuje kapitola 3, která se zabývá výpočtem únosnosti prvku namáhaného normálovou silou a ohybovým momentem.

2.1 Průřez namáhaný ohybovým momentem

2.1.1 ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars [1]

2.1.1.1 Základní předpoklady návrhu

Materiálové charakteristiky poskytnuté výrobcem, jako je např. zaručená pevnost v tahu, jsou uvažovány jako počáteční vlastnosti, které nezahrnují dlouhodobé účinky okolí, kterému jsou vystaveny. Jelikož dlouhodobé vystavení FRP výztuží okolním vlivům negativně ovlivňuje jejich vlastnosti, byl zaveden součinitel C_E , který redukuje počáteční krátkodobé vlastnosti.

Návrhová pevnost FRP výztuží v tahu f_{fu} se určí dle vztahu

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*, \quad (2.1)$$

kde C_E je redukční součinitel lišící se v závislosti na typu použitých vláken a okolním prostředí,

f_{fu}^* je zaručená pevnost v tahu definovaná dle vztahu

$$f_{fu}^* = f_{u,ave} - 3\sigma, \quad (2.2)$$

kde $f_{u,ave}$ je střední hodnota pevnosti vzorků v tahu,

σ je směrodatná odchylka.

Obdobně lze stanovit návrhové mezní přetvoření ε_{fu}

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*, \quad (2.3)$$

kde ε_{fu}^* je zaručené mezní přetvoření, které je definováno vztahem

$$\varepsilon_{fu}^* = \varepsilon_{u,ave} - 3\sigma, \quad (2.4)$$

kde $\varepsilon_{u,ave}$ je střední hodnota mezního přetvoření vzorků.

Návrhový modul pružnosti se rovná hodnotě uváděné výrobcem, tedy

$$E_f = E_{f,ave}; \quad (2.5)$$

jedná se o střední hodnotu této veličiny.

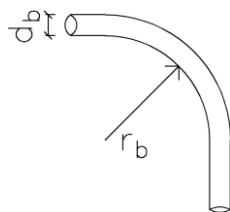
Redukce pevnosti v tahu zakřiveného prvku oproti prvku přímému je dána vztahem vycházejícím z Japonské normy (Japan Society of Civil Engineers, 1997 podle ACI 440.1R-06 [1])

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fu} \leq f_{fu}, \quad (2.6)$$

kde f_{fb} je návrhová pevnost FRP výztuže v tahu za ohybu,

r_b je poloměr ohybu,

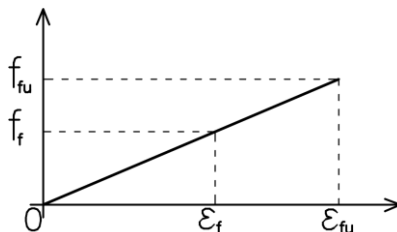
d_b je průměr výztužného prutu.



Obr. 2.1 Označení poloměru ohybu a průměru výztuže

2.1.1.2 Návrh a posouzení ohýbaného prvku

Návrh betonových prvků s FRP výztuží namáhaných ohybem je obdobný návrhu železobetonových prvků. Při návrhu by měl být uvažován pracovní diagram FRP výztuže při jednoosém namáhání.



Obr. 2.2 Pracovní diagram FRP výztuže

2.1.1.2.1 Filozofie návrhu ohýbaných prvků

Průřezy železobetonových prvků běžně obsahují takové množství výztuže, aby bylo zajištěno zplastizování oceli před drcením betonu. Zplastizování oceli zajišťuje duktilitu a signalizuje případný blížící se kolaps. Křehké chování FRP výztuží při tahovém porušení vyžaduje přehodnocení tohoto přístupu.

Porušení drcením betonu je obecně přijatelnější způsob porušení než přetržení výztuže. Nedostatek duktility by měl být vynahrazen rezervou v únosnosti.

Použitím vysokopevnostního betonu lze lépe využít vlastnosti FRP výztuží, které vykazují vysokou pevnost. Vysokopevnostní beton zvyšuje tuhost průřezů porušených trhlinou, ale jeho křehkost v porovnání s betonem běžné pevnosti může snížit celkovou poddajnost ohýbaného prvku.

Výpočet únosnosti průřezu je založen na následujících předpokladech:

- průřez zůstává rovinný i po přetvoření,
- maximální tlakové přetvoření betonu je rovno 0,003,
- tahová pevnost betonu se zanedbává,
- chování FRP výztuže v tahu je lineární až do porušení,
- platí dokonalá soudržnost mezi betonem a FRP výztuží.

2.1.1.2.2 Moment únosnosti

Základní filozofie návrhu předpokládá, že návrhový moment únosnosti ϕM_n musí být větší nebo roven momentu od zatížení M_u

$$\phi M_n \geq M_u, \quad (2.7)$$

kde ϕ je redukční faktor ohybové únosnosti, viz kap. 2.1.1.2.5.

Výpočet momentu únosnosti je založen na předpokladu dokonalé soudržnosti mezi betonem a výztuží a vychází z rovnováhy sil na průřezu.

2.1.1.2.3 Způsoby porušení prvku

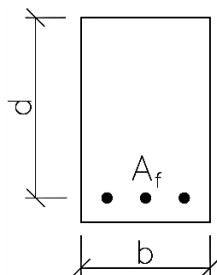
Únosnost prvku se odvíjí od způsobu porušení, který může nastat buď drcením tlačené části průřezu nebo přetržením FRP výztuže. Způsob porušení je určen porovnáním skutečného stupně vyztužení ρ_f s tzv. balančním stupněm vyztužení ρ_{fb} . Balanční stupeň vyztužení je definován právě takovou plochou výztuže k ploše prvku, kdy dojde zároveň k porušení drcením betonu i k přetržení výztuže. Jelikož FRP výztuž nemá mez kluzu (neplastizuje), balanční stupeň vyztužení je vypočítán z návrhové pevnosti v tahu f_{fu} .

Skutečný stupeň vyztužení lze vypočítat jako množství podélné tahové výztuže A_f na účinnou plochu průřezu (Obr. 2.3) dle vztahu

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d}, \quad (2.8)$$

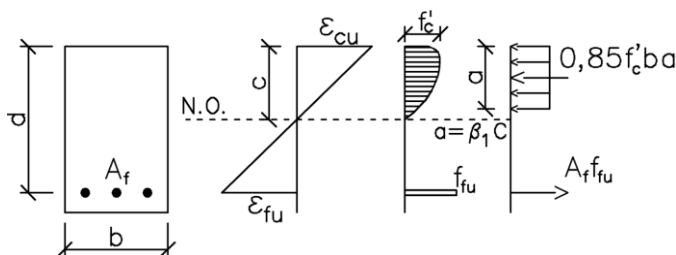
kde b je šířka průřezu,

d je účinná výška průřezu.



Obr. 2.3 Označení tažené FRP výztuže a rozměrů průřezu

Výpočet únosnosti průřezu při balančním stupni vyztužení je odvozen ze způsobu porušení průřezu, kdy je dosaženo mezního přetvoření betonu v tlaku, tedy lze použít zjednodušené obdélníkové rozdělení napětí v tlačené části průřezu (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Způsob porušení při balančním stupni vyztužení [1]

Výška náhradního obdélníkového rozdělení napětí v tlačené části průřezu a je definována vztahem

$$a = \beta_1 c, \quad (2.9)$$

kde β_1 je součinitel upravující výšku náhradního obdélníkového rozdělení napětí v závislosti na třídě betonu,

c je vzdálenost neutrální osy od tlačeného okraje průřezu.

Pro tento způsob porušení je výpočet síly v tlačené části průřezu C dán vztahem

$$C = 0,85 f'_c b a, \quad (2.10)$$

kde f'_c je zaručená pevnost betonu v tlaku.

Tahová síla FRP výztuže T je pro případ, kdy je v této výztuži dosaženo limitního přetvoření definována

$$T = A_f f_{fu}, \quad (2.11)$$

Z podmínky rovnováhy sil na průřezu (položením rovnosti mezi (2.10) a (2.11)) vyplývá vztah

$$0,85 f'_c b a = A_f f_{fu}. \quad (2.12)$$

Vyjádřením a z rovnice (2.12) získáme vztah

$$a = \frac{A_f f_{fu}}{0,85 f'_c b}. \quad (2.13)$$

Z předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci (Obr. 2.4) je vyjádřen vztah pro určení polohy neutrální osy při balančním způsobu porušení průřezu

$$c = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d, \quad (2.14)$$

kde ε_{cu} je mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku.

Dosazením (2.13) a (2.14) do (2.9) získáme vztah

$$\frac{A_f f_{fu}}{0,85 f'_c b} = \beta_1 \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d. \quad (2.15)$$

Vyjádřením plochy FRP výztuže A_f z (2.15) a dosazením do (2.8) je dán vztah pro výpočet balančního stupně vyztužení

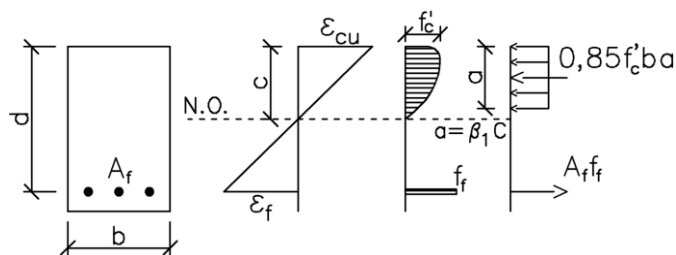
$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}}. \quad (2.16)$$

Pokud nastává případ, že je skutečný stupeň vyztužení menší než balanční ($\rho_f < \rho_{fb}$), k porušení prvku dochází přetržením FRP výztuže. V opačném případě ($\rho_f > \rho_{fb}$) dochází k porušení drcením betonu.

Balanční stupeň vyztužení pro prvek s FRP výztuží ρ_{fb} je mnohem nižší než pro prvek vyztužený klasickou ocelovou výztuží ρ_b . Ve skutečnosti může být ρ_{fb} dokonce nižší než minimální stupeň vyztužení železobetonu.

2.1.1.2.4 Stanovení momentu únosnosti

Pokud platí případ $\rho_f > \rho_{fb}$, k porušení prvku dochází drcením betonu a rozdělení napětí v tlačené části betonu může být nahrazeno obdélníkovým rozdělením napětí.



Obr. 2.5 Způsob porušení drcením betonu [1]

Stanovení výšky náhradního obdélníkového rozdělení napětí a je obdobné vztahu (2.13), pouze s tím rozdílem, že přetvoření výztuže nedosahuje své limitní hodnoty

$$a = \frac{A_f f_f}{0,85 f'_c b}. \quad (2.17)$$

Napětí ve výztuži f_f je možné určit z Hookeova zákona (Obr. 2.2)

$$f_f = E_f \varepsilon_f, \quad (2.18)$$

kde ε_f je přetvoření FRP výztuže, které lze určit z podobnosti trojúhelníků (obr. 2.4)

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a}. \quad (2.19)$$

Dosazením (2.19) do (2.18) je dán vztah pro výpočet napětí v FRP výztuži

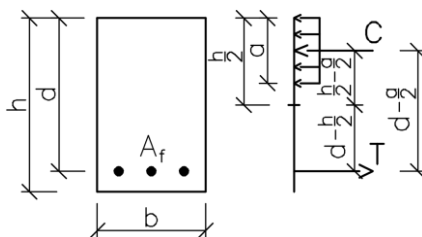
$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a}. \quad (2.20)$$

Dosazení rovnice (2.17) do (2.20) vede na přímý vztah pro výpočet napětí ve výztuži f_f při způsobu porušení prvku způsobené drcením betonu

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \right) \leq f_{fu}. \quad (2.21)$$

Moment únosnosti M_n lze vypočítat z předpokladu o dokonalé soudržnosti (přetvoření výztuže je ekvivalentní přetvoření betonu) a předpokladu rovnováhy sil na průřezu. Síla působící v tlačené části průřezu C lze určit dle vztahu (2.10). Tahová síla ve výztuži T je určena vztahem

$$T = A_f f_f. \quad (2.22)$$



Obr. 2.6 Rameno vnitřních sil pro výpočet momentu únosnosti

Výsledný moment únosnosti lze určit z rovnice

$$M_n = T z, \quad (2.23)$$

kde z je rameno vnitřních sil, dle (Obr. 2.6) dáno vztahem

$$z = d - \frac{a}{2}. \quad (2.24)$$

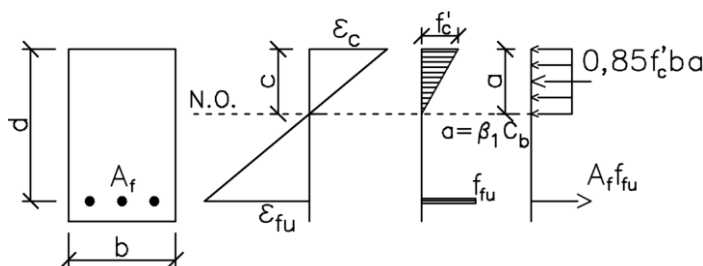
Dosazením vztahů (2.22) a (2.24) do (2.23) je dán vztah pro výpočet momentu únosnosti

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad (2.25)$$

Dosazením stupně vyztužení (2.8) do (2.25) a s využitím předpokladu o rovnováze sil na průřezu pro stanovení výšky tlačené části průřezu, dostaneme alternativní vztah

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2. \quad (2.26)$$

Pokud platí nerovnost $\rho_f < \rho_{fb}$, dochází k porušení přetržením FRP výztuže. Jelikož v okamžiku přetržení FRP výztuže není dosaženo limitního přetvoření betonu ($\varepsilon_c < 0,003$), nelze použít klasické nahrazení napětí v tlačené části průřezu obdélníkem. V tomto případě je nutné použít ekvivalentní průběh napětí.



Obr. 2.7 Způsob porušení přetržením FRP [1]

Je zřejmé, že hodnota dosaženého poměrného přetvoření betonu ε_c a tím i výška tlačené části průřezu c je neznámou, což je způsobeno lineárním chováním FRP výztuže až do porušení (Obr. 2.2). Při dosažení mezního přetvoření výztuže je průběh napětí v tlačené části průřezu neznámý a může být buď zcela lineární, nebo se již některá jeho část může nacházet v plastické oblasti. V normě [1] není přesné řešení při tomto způsobu porušení uvedeno. Vychází se ze vztahu pro způsob porušení drcením betonu (2.25)

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right). \quad (2.27)$$

Člen $\beta_1 c$ v rovnici (2.27) je závislý na materiálových charakteristikách a stupni vyztužení. Jeho maximální hodnota je rovna $\beta_1 c_b$ a je dosažena v případě dosažení limitního přetvoření betonu ($\varepsilon_c = 0,003$). Zjednodušený a konzervativní výpočet momentu únosnosti prvku lze vyjádřit vztahem

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right), \quad (2.28)$$

kde c_b je výška tlačené části průřezu při balančním způsobu porušení dána vztahem

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d. \quad (2.29)$$

Tímto způsobem je určena největší možná výška tlačené části průřezu a při výpočtu momentu únosnosti M_n dle vztahu (2.28) je použito nejmenší možné rameno vnitřních sil a tím i nejmenší moment únosnosti. Předpoklad rovnováhy sil na průřezu však není dodržen.

2.1.1.2.5 Redukční faktor ohybové únosnosti

Redukční faktor se používá pro zajištění dostatečné rezervy přetvoření (duktility). Velikost redukčního součinitele je závislá na typu porušení.

Při porušení drcením betonu je redukční faktor $\phi = 0,65$, vycházející z ACI 318-05 [5]. V případě porušení přetržením FRP výztuže je stanoven na hodnotu $\phi = 0,55$. Tímto je zabezpečeno, že nedojde ke kolapsu již při nepatrném překročení návrhové únosnosti.

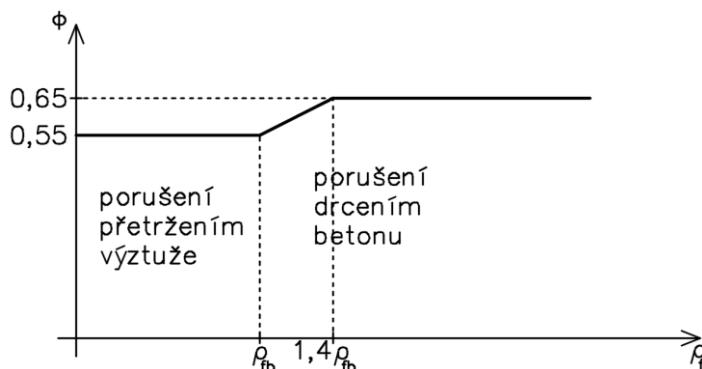
Skutečné provedení konstrukce na stavbě se však může lišit od výpočtů (např. použitím vyšší pevnosti betonu nebo větší tloušťkou betonové vrstvy). Nemusí tak dojít k předpokládanému porušení drcením betonu, ale k porušení přetržením výztuže. Z tohoto důvodu a pro zajištění přechodu mezi dvěma hodnotami ϕ je uvažováno porušení drcením betonu až od hodnoty $\rho_f > 1,4\rho_{fb}$.

Při skutečném stupni vyztužení v intervalu $\rho_f \in (\rho_{fb}; 1,4\rho_{fb})$ se redukční faktor ϕ určí dle vztahu

$$\phi_{(\rho_{fb}; 1,4\rho_{fb})} = 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}}, \quad (2.30)$$

tedy

$$\phi = \begin{cases} 0,55 & \text{pro } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} & \text{pro } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4\rho_{fb} \\ 0,65 & \text{pro } \rho_f \geq 1,4\rho_{fb} \end{cases} \quad (2.31)$$



Obr. 2.8 Hodnota redukčního faktoru jako funkce stupně výztužení [1]

2.1.1.2.6 Minimální plocha výztuže

Pokud je u prvku předpokládáno porušení přetržením výztuže, musí být stanovena minimální plocha výztuže, aby bylo zajištěno porušení prvku až po vzniku trhlin v betonu

$$\phi M_n \geq M_{cr}, \quad (2.30)$$

kde M_{cr} je moment na mezi vzniku trhlin.

Vztah pro minimální plochu FRP výztuže vychází ze stejného předpokladu jako pro výpočet minimální plochy ocelové výztuže – v průřezu musí být přítomno takové množství výztuže, aby došlo k vytvoření trhlin v betonu ještě před porušením výztuže. Z důvodu rozdílné hodnoty redukčního faktoru pro FRP výztuž ($\phi = 0,55$ oproti $0,9$ u oceli) je výsledný vztah dán vynásobením vztahu pro ocelovou výztuž dle ACI 318-05 [6] hodnotou $1,64$ ($1,64 = 0,9/0,55$). To vede na vztah

$$A_{f,min}^* = 1,64 \frac{3\sqrt{f_c'^*}}{f_{fu}^*} b_w^* d^* = \frac{4,9\sqrt{f_c'^*}}{f_{fu}^*} b_w^* d^* \geq \frac{330}{f_{fu}^*} b_w^* d^*, \quad (2.33)$$

kde $A_{f,min}^*$ je minimální plocha výztuže v jednotkách Angloamerické měrné soustavy,

$f_c'^*$ je pevnost betonu v tlaku v jednotkách Angloamerické měrné soustavy,

f_{fu}^* je pevnost FRP výztuží v tahu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy,

b_w^* je účinná šířka průřezu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy,

d^* je účinná výška průřezu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy.

Vztah (2.33) se však váže k Angloamerické měrné soustavě jednotek. V soustavě jednotek SI má vztah podobu

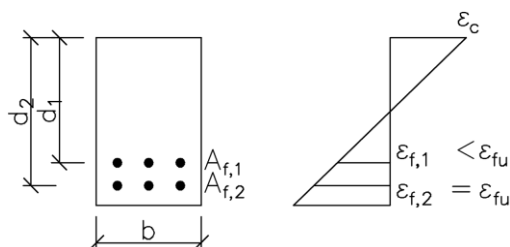
$$A_{f,min} = \frac{0,41\sqrt{f_c'}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2,26}{f_{fu}} b_w d. \quad (2.34)$$

Pokud není předpokládáno porušení přetržením výztuže $\rho_f > \rho_{fb}$, minimální plocha výztuže zabezpečující vznik trhlin před porušením je automaticky dosažena.

2.1.1.3 Další ustanovení

2.1.1.3.1 Více vrstev výztuže a kombinace různých druhů výztuže

V případě železobetonového prvku se předpokládá, že při dosažení momentu únosnosti je ve veškeré tažené výztuži dosaženo meze kluzu i v případě několika vrstev výztuže. Tudíž lze přibližně nahradit stejnou výztuž ve více vrstvách silou působící v těžišti výztuží o hodnotě rovné násobku sumy ploch a pevnosti v tahu. Jelikož FRP výztuž nemá plastickou větev, napětí v každé vrstvě se bude lišit v závislosti na vzdálenosti od neutrální osy. Obdobně je nutné jednotlivé určení napětí v příslušné vrstvě při použití různých druhů výztuže. Tudíž je porušení vnější vrstvy (nejblíže taženému okraji průřezu) rozhodující pro stanovení ohybové únosnosti prvku.



Obr. 2.9 Přetvoření průřezu s více vrstvami výztuže

2.1.1.3.2 Redistribuce momentů

Mechanismus porušení prvku s FRP výztuží by neměl být založen na vytváření plastických kloubů, protože FRP výztuže vykazují lineárně pružné chování až do porušení. Redistribuce momentů u spojitých nosníků nebo jiných staticky neurčitých konstrukcí by tedy neměla být uvažována.

2.1.1.3.3 Tlačená výztuž

Výztuž na bázi FRP vykazuje znatelně nižší pevnost v tlaku než v tahu, proto je doporučeno tlakovou únosnost FRP výztuží ve výpočtu zanedbat.

Norma [1] nedoporučuje užití FRP jako podélné výztuže ve sloupech nebo jako tlačenou výztuž v ohýbaných prvcích. V některých případech se nelze vyhnout umístění výztuže do tlačené oblasti prvku, například v místech nad podporami nebo jako konstrukční výztuže. V těchto případech by mělo být zabráněno jejímu vybočení a zajištěno omezení jejího relativně velkého příčného rozpínání u některých druhů FRP výztuží. Vzájemné vzdálenosti příčné výztuže ve formě třmínků by neměly být větší než šířka prvku nebo 16 průměrů podélné výztuže případně 48 průměrů příčné výztuže.

2.1.2 ISIS Canada Design Manual 2007 [2]

2.1.2.1 Základní předpoklady návrhu

Porušení ohýbaného prvku může nastat přetržením výztuže nebo drcením betonu. Ohybovou únosnost pro oba druhy porušení lze určit obdobným způsobem jako při výpočtu železobetonových prvků.

Předpoklady použité při návrhu průřezu vyztuženého FRP výztuží:

- limitní poměrné přetvoření betonu v tlaku je 0,0035,
- pevnost betonu v tahu je zanedbána,
- přetvoření betonu a FRP výztuže je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy,
- závislost mezi napětím a přetvořením je u FRP výztuží lineární až do porušení,
- platí dokonalá soudržnost mezi betonem a FRP výztuží.

2.1.2.2 Kompatibilita přetvoření

Filozofie návrhu je založena na předpokladu, že průřez rovinný před deformací zůstává rovinný i po deformaci. To vede k lineárnímu rozdělení přetvoření po průřezu.

Pokud je testy prokázáno, že lze v tlačeném betonu dosáhnout většího poměrného přetvoření než 0,0035, je možno tuto vyšší hodnotu uvažovat ve výpočtu. Velikost maximálního přetvoření betonu je důležitá při stanovení balančního stupně vyztužení ρ_{frpb} a určuje druh porušení průřezu.

2.1.2.3 Druhy porušení

Existují tři možné druhy porušení ohýbaného prvku vyztuženého FRP výztuží:

- balanční porušení – dochází k současnému porušení přetržením FRP výztuže a drcením betonu,
- tlakové porušení – dochází k drcení betonu, zatímco přetvoření FRP výztuže je menší než limitní,
- tahové porušení – únosnost průřezu je definována přetržením FRP výztuže před dosažením limitního přetvoření v betonu.

Z hlediska návrhu ohýbaného prvku s FRP výztuží je tlakové porušení žádanější než tahové a je přirovnatelné k porušení „převyztuženého“ železobetonového průřezu.

Tahové porušení přetržením FRP výztuže při nedosažení limitního přetvoření tlačeného betonu je náhlé. Nastává, když je skutečný stupeň vyztužení menší než balanční stupeň vyztužení.

Oba druhy porušení jsou povoleny v CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code, 2006 podle ISIS Canada [2]), která udává dodatečné bezpečnostní doporučení (2.35) při porušení přetržením FRP výztuže. Tato příručka doporučuje tento přístup uvažovat pro pozemní stavby i mosty. Doporučuje se dodržet podmínku, která udává, že moment únosnosti M_r musí být větší nebo roven 1,5 násobku návrhového momentu od zatížení M_f

$$M_r \geq 1,5M_f. \quad (2.35)$$

2.1.2.3.1 Balanční způsob porušení

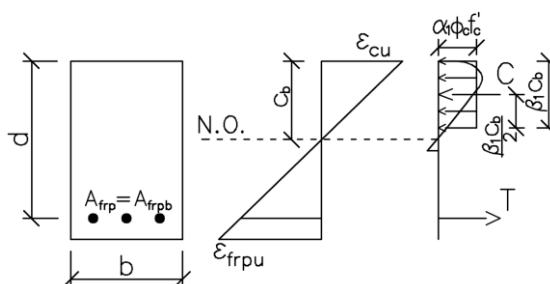
Balanční stupeň vyztužení je pojem používaný v případech, kdy je množství tažené FRP výztuže takové, že dochází zároveň k dosažení limitního poměrného přetvoření betonu v tlaku ε_{cu} a vnější vrstva FRP výztuže dosáhne mezního přetvoření ε_{frpu} . Jelikož FRP výztuže nevykazují plastické chování, při současném dosažení limitních přetvoření obou materiálů dochází k náhlému kolapsu. Tento jev je definován jako balanční porušení. Z předpokladu dokonalé soudržnosti mezi FRP výztuží a betonem a lineárního průběhu přetvoření (Obr. 2.10) lze zapsat závislost přetvoření na vzdálenosti od neutrální osy vztahem

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{frpu}}. \quad (2.36)$$

kde c_b je vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje průřezu,

d je účinná výška.

Rozdělení napětí v tlačené části průřezu není lineární. Podle CSA (CSA A23.3-04 podle ISIS Canada [2]) lze toto rozdělení napětí nahradit náhradním obdélníkem definovaným parametry α_l a β_l (Obr. 2.10).



Obr. 2.10 Způsob porušení při balančním stupni vyztužení [2]

Rovnováha sil na průřezu bez zahrnutí vlivu redukčních součinitelů je vyjádřena vztahem

$$C = T, \quad (2.37)$$

kde C je síla v tlačené části průřezu,

T je tahová síla v FRP výztuži.

Výslednice sil se vypočtou jako

$$C = \alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c_b b, \quad (2.38)$$

$$T = \phi_{frp} \varepsilon_{frpu} E_{frp} A_{frpb} = \phi_{frp} f_{frpu} A_{frpb}, \quad (2.39)$$

kde α_1 je poměr průměrného napětí v obdélníkovém rozložení napětí k pevnosti betonu (vztah 2.40),

β_1 je poměr výšky obdélníkového rozložení napětí ke vzdálenosti neutrální osy od tlačného okraje průřezu (vztah 2.41),

ϕ_c je redukční součinitel pevnosti betonu,

ϕ_{frp} je redukční součinitel pevnosti FRP výztuže,

f'_c je pevnost betonu v tlaku,

b je šířka prvku,

A_{frpb} je plocha FRP výztuže při balančním stupni vyztužení,

E_{frp} je modul pružnosti FRP výztuže,

f_{frpu} je pevnost FRP výztuže v tahu.

Hodnoty součinitelů upravujících rozměry náhradního rozdělení napětí lze vyjádřit vztahy

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c \geq 0,67, \quad (2.40)$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67. \quad (2.41)$$

Po rozepsání lze tedy rovnováhu sil na průřezu dosazením (2.38) a (2.39) do (2.37) vyjádřit jako

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c_b b = \phi_{frp} f_{frpu} A_{frpb}. \quad (2.42)$$

Dosazením (2.36) do (2.42) je definován vztah pro výpočet balančního stupně vyztužení

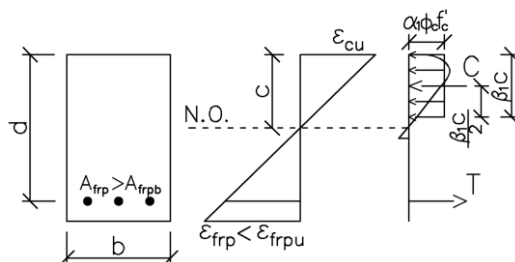
$$\rho_{frpb} = \frac{A_{frpb}}{b d}, \quad (2.43)$$

$$\rho_{frpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{\phi_c}{\phi_{frp}} \frac{f'_c}{f_{frpu}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{frpu}} \right). \quad (2.44)$$

2.1.2.3.2 Porušení způsobené drcením betonu

V případě, že je porušení ohýbaného prvku iniciováno drcením betonu bez přetržení výztuže, lze nazvat průřez „převyztuženým“. V případě T-profilu je v tomto případě nutné velké množství výztuže, což se mnohdy jeví jako neekonomické. Vztahy uvedené v této kapitole se tedy vztahují pouze na průřezy tvaru obdélníku.

Přetvoření krajních vláken průřezu je rovno meznímu přetvoření tlačného betonu $\varepsilon_{cu} = 0,0035$ (Obr. 2.11). Dochází tedy k drcení betonu a tím i k porušení prvku. Nelineární rozložení napětí v tlačné části průřezu je nahrazeno ekvivalentním obdélníkovým rozložením na tlačné části průřezu dle CSA (CSA A23.3-04 podle ISIS Canada [2]).



Obr. 2.11 Způsob porušení drcením betonu [2]

Sílu v tlačné části průřezu lze stanovit dle vztahu

$$C = \alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c b, \quad (2.45)$$

kde c je vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje průřezu.

Tahovou sílu v FRP výztuži lze vyjádřit vztahem

$$T = A_{frp} \phi_{frp} f_{frp}, \quad (2.46)$$

kde A_{frp} je plocha FRP výztuže,

f_{frp} je napětí v FRP výztuži.

Položením rovnosti mezi silami C (2.45) a T (2.46) lze vyjádřit výšku náhradního obdélníkového rozdělení napětí v tlačné části průřezu

$$\beta_1 c = \frac{A_{frp} \phi_{frp} f_{frp}}{\alpha_1 \phi_c f'_c b}. \quad (2.47)$$

Z předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci a pomocí Obr. 2.11 lze odvodit vztah

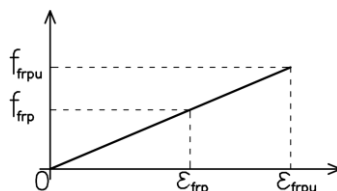
$$\frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_{cu}} = \frac{d-c}{c}. \quad (2.48)$$

Vyjádřením poměrného přetvoření FRP výztuže

$$\varepsilon_{frp} = \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c}. \quad (2.49)$$

Pomocí Hookeova zákona je možné určit vztah pro výpočet napětí ve výztuži

$$f_{frp} = E_{frp} \varepsilon_{frp} = E_{frp} \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c}. \quad (2.50)$$



Obr. 2.12 Pracovní diagram FRP výztuže

Dosažením (2.47) do (2.50) lze odvodit přímý vztah pro výpočet napětí ve výztuži

$$f_{frp} = 0,5 E_{frp} \varepsilon_{cu} \left[\left(1 + \frac{4 \alpha_1 \beta_1 \phi_c f'_c}{\rho_{frp} \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{cu}} \right)^{1/2} - 1 \right], \quad (2.51)$$

kde ρ_{frp} je stupeň vyztužení průřezu definovaný vztahem

$$\rho_{frp} = \frac{A_{frp}}{b d}. \quad (2.52)$$

Dle CSA (CSA A23.3-94 podle ISIS Canada [2]) nastává porušení způsobené drcením betonu při dosažení mezního poměrného přetvoření $\varepsilon_{cu} = 0,0035$ a hodnoty součinitelů α_1 a β_1 jsou definovány pro případ balančního porušení.

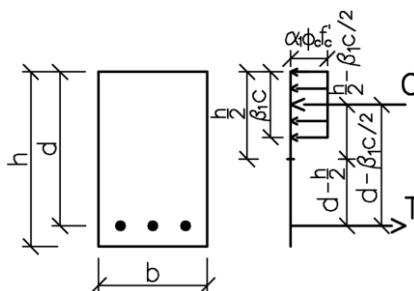
Alternativně lze použít iterační proces. Iteračně se volí poloha neutrální osy, dokud není dosaženo rovnováhy sil na průřezu dle vztahu

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c b = A_{frp} \phi_{frp} \varepsilon_{frp} E_{frp}. \quad (2.53)$$

Při změně výšky neutrální osy c dojde k přepočítání sil C a T s novými hodnotami c a ε_{frp} .

Po dosažení rovnováhy sil (2.53) je možno vypočítat výsledný moment únosnosti M_r

$$M_r = C \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right). \quad (2.54)$$



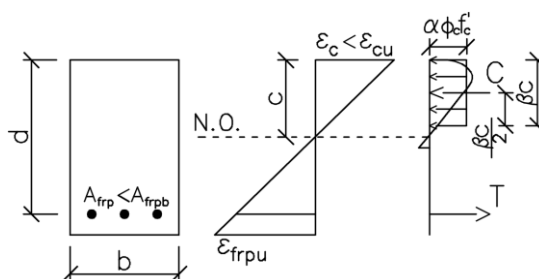
Obr. 2.13 Rameno vnitřních sil pro výpočet momentu únosnosti

2.1.2.3.3 Porušení způsobené přetržením výztuže

V případě prvku vyztuženého ocelovou výztuží je před porušením prvku dosaženo meze kluzu ve výztuži, dojde ke zplastizování oceli a ke znatelnému nárůstu deformace před dosažením mezního přetvoření v krajních tlačných vláknech průřezu. Obvykle je rozdělení napětí v tlačné části průřezu nahrazeno obdélníkem. V případě prvku s FRP výztuží však až do porušení platí lineární závislost mezi napětím a přetvořením. Výztuže na bázi FRP nemají mez kluzu, tudíž nedochází k jejich plastizování. Mezní přetvoření v FRP výztuži ε_{frpu} lze tedy vyjádřit dle Hookeova zákona (Obr. 2.12)

$$\varepsilon_{frpu} = \frac{f_{frpu}}{E_{frp}}. \quad (2.55)$$

Dosažené přetvoření krajních vláken průřezu ε_c je menší než mezní tlakové přetvoření ε_{cu} . Tudíž nelze použít klasické obdélníkové rozložení napětí v tlačné části průřezu, jako tomu bylo v případě porušení způsobené drcením betonu. Jsou tedy zavedeny součinitele α a β . Tyto součinitele mají stejný význam jako součinitele α_1 a β_1 , ale jejich velikost je závislá na úrovni dosaženého přetvoření krajních tlačných vláken průřezu a pevnosti betonu. Určení velikosti těchto součinitelů je možné dle tab. B.1 až B.3 v ISIS Canada [2] na základě poměru $\varepsilon_c/\varepsilon_0$, kde ε_0 je přetvoření betonu při maximálním působícím napětí. Případně je pro stanovení hodnot α a β možné použít Obr. 2.15 a Obr. 2.16.



Obr. 2.14 Způsob porušení přetržením FRP výztuže [2]

Při řešení únosnosti prvku při tomto způsobu porušení je nutné použít iterační postup. Součinitele α a β jsou funkcemi přetvoření betonu v krajních vláknech ε_c , které je neznámou. Zvolením polohy neutrální osy c ($c < c_b$) lze dosažené přetvoření betonu ε_c určit za předpokladu rovinnosti průřezu dle vztahu

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{frpu} \frac{c}{d-c}. \quad (2.56)$$

Pro vypočtené přetvoření betonu ε_c jsou určeny hodnoty součinitelů α a β a pomocí nich i výslednice sil v tlačné části průřezu dána vztahem

$$C = \alpha \phi'_c \beta c b. \quad (2.57)$$

Výslednice tahových sil FRP výztuže je určena vztahem

$$T = A_{frp} \phi_f \varepsilon_{frpu} E_{frp}. \quad (2.58)$$

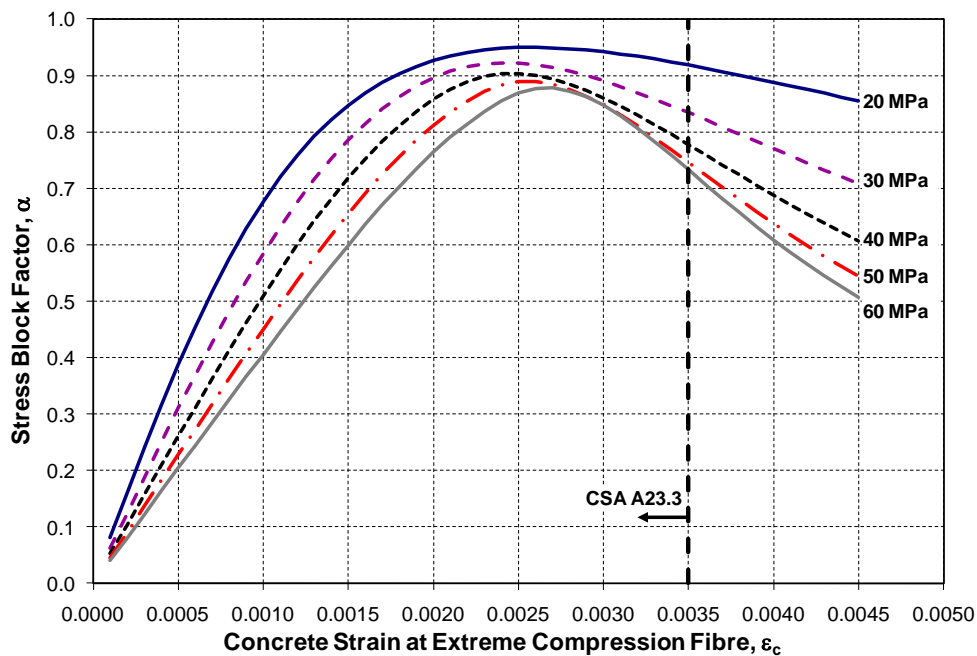
Rovnováha sil na průřezu je zapsána porovnáním rovnic (2.57) a (2.58)

$$\phi_c f'_c \beta c b = A_{frp} \phi_f \varepsilon_{frpu} E_{frp}. \quad (2.59)$$

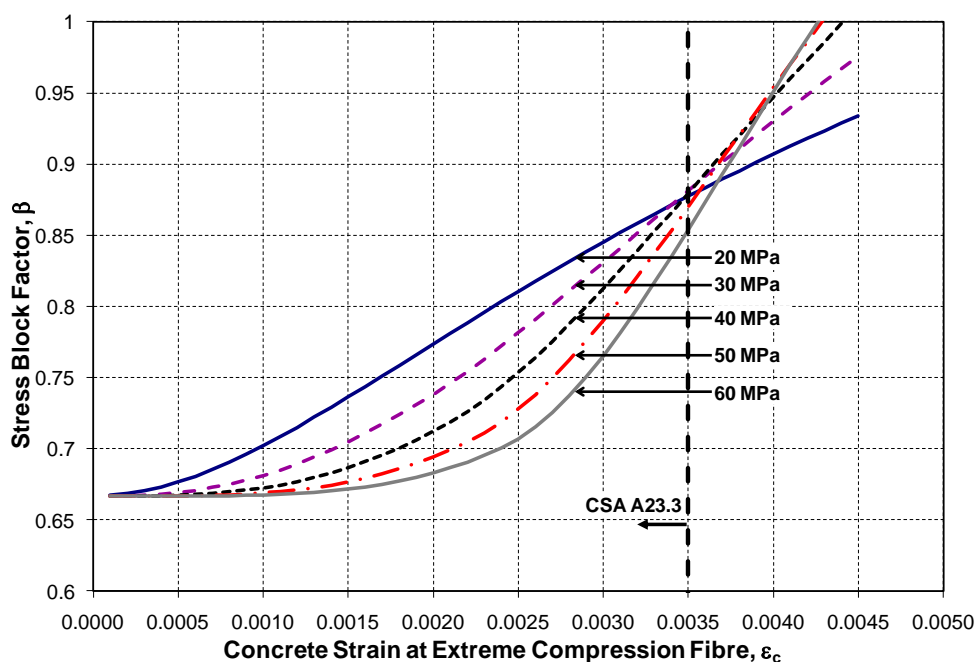
Pokud není dosaženo rovnováhy mezi těmito dvěma silami (2.59), je nutné zavést další iteraci s novou polohou neutrální osy c , přetvoření výztuže zůstává rovno ε_{frpu} .

Při splnění rovnováhy sil je možné přistoupit k výpočtu momentu únosnosti

$$M_r = T \left(d - \frac{\beta c}{2} \right). \quad (2.60)$$



Obr. 2.15 Hodnoty součinitele α v závislosti na ε_c [2]



Obr. 2.16 Hodnoty součinitele β závislosti na ε_c [2]

2.1.2.4 Moment na mezi vzniku trhlin M_{cr}

Ke vzniku trhlin dochází, když napětí v krajních vláknech průřezu dosahuje pevnosti betonu v tahu f_r . Velikost momentu, kdy k tomuto jevu dochází, lze stanovit

$$M_{cr} = \frac{f_r I_t}{y_t}, \quad (2.61)$$

kde I_t moment setrvačnosti neporušené části průřezu k těžišťové ose,

y_t vzdálenost těžiště neporušené části k taženému okraji.

Náhradní neporušená oblast je určena jako ideální průřez A_i

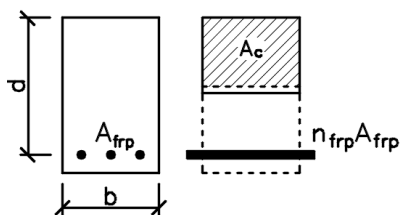
$$A_i = A_c + (n_{frp} - 1)A_{frp}, \quad (2.62)$$

kde A_c je plocha betonu,

n_{frp} je pracovní součinitel vypočten dle vztahu

$$n_{frp} = \frac{E_{frp}}{E_c}, \quad (2.63)$$

kde E_c je modul pružnosti betonu.



Obr. 2.17 Ideální průřez

Pro vyloučení náhlého porušení přetržením FRP výztuže, musí být plocha FRP výztuže natolik velká, aby byla splněna podmínka

$$M_r \geq M_{cr}. \quad (2.64)$$

2.1.2.5 Minimální ohybová únosnost

Musí být zamezeno kolapsu prvku ihned po vytvoření trhlin. Tudiž by měl být moment na mezi únosnosti M_r alespoň o 50 % větší než moment na úrovni vzniku trhlin M_{cr}

$$M_r \geq 1,5M_{cr}. \quad (2.65)$$

Pokud není splněna předchozí podmínka, moment na mezi únosnosti M_r by měl být alespoň o 50 % větší než návrhový moment od zatížení M_f .

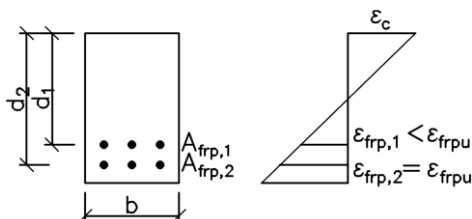
2.1.2.6 Doplnující podmínka pro tahové porušení

Při tahovém porušení je dle CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code, 2006 podle ISIS Canada [2]) doporučeno dodržet v mezním stavu únosnosti podmínku

$$M_r \geq 1,5M_f. \quad (2.66)$$

2.1.2.7 Prvky vyztužené více vrstvami FRP výztuže

V případě prvku s více vrstvami FRP výztuže je přetvoření vrstvy nejbližší taženému okraji průřezu největší, tudiž rozhodující pro návrh. Hodnota dosaženého přetvoření této vrstvy určuje způsob porušení prvku. Napětí v každé vrstvě výztuže je rozdílné a tedy není možné výslednici tahových sil umístit do těžiště vrstev výztuží, ale je nutné každou vrstvu řešit odděleně a napětí ve vrstvách určit z předpokladu rovinnosti průřezu po deformaci.



Obr. 2.18 Průřez s více vrstvami výztuže

2.1.2.8 Prvky s tlačnou výztuží

V případě spojitých nosníků nebo desek může být FRP výztuž umístěna v tlačných oblastech prvku. Únosnost FRP výztuže v tlaku by však neměla být započítána do únosnosti.

2.1.2.9 Nosníky s více druhy výztuže

Při návrhu lze využít kombinaci několika druhů FRP výztuží. Pokud se dva různé typy FRP výztuže nacházejí v odlišných místech nosníku, návrh lze jednoduše provést na základě vhodného využití vlastností výztuží v každé z oblastí. Pokud se však nachází ve stejné oblasti průřezu, musí být dodržen předpoklad stejného přetvoření obou typů výztuží.

2.1.3 CNR-DT 203/2006 [3]

V tomto předpisu je popsán postup výpočtu únosnosti ohýbaného prvku velice stručně. Je patrné, že tento předpis i fib Bulletin No.40 [4] mají stejný základ v EN 1992 [6]. Z tohoto důvodu je postup výpočtu únosnosti ohýbaného prvku popsáný v [4] použitelný i pro tento předpis. Vztahy popsané v kap. 2.1.4.4 je tedy možné použít s dosazením návrhových charakteristik FRP výztuže dle CNR-DT [3].

2.1.3.1 Předpoklady návrhu

Návrh na mezní stav únosnosti musí splňovat základní podmínku, kdy návrhový moment od zatížení M_{Sd} a moment únosnosti M_{Rd} splňují následující nerovnost

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}. \quad (2.67)$$

Analýza mezního stavu únosnosti prvku s FRP výztuží vychází z následujících základních předpokladů:

- průřez zůstává rovinný i po deformaci až do porušení,
- platí dokonalá soudržnost mezi FRP výztuží a betonem,
- beton v tahu nepůsobí,
- příspěvek tlakové únosnosti FRP výztuže je zanedbán,
- základní postupy výpočtů pro beton dle aktuálních norem,
- v FRP výztuži je uvažováno lineárně pružné chování až do porušení.

Předpokládá se, že porušení při ohybu nastává, když nastane jedna z následujících podmínek:

- je dosaženo mezního poměrného přetvoření betonu ε_{cu} ,
- je dosaženo návrhové mezní poměrné přetvoření FRP výztuže ε_{fd} v tahu, které lze určit z charakteristické hodnoty mezního přetvoření ε_{fk}

$$\varepsilon_{fd} = 0,9 \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \quad (2.68)$$

kde η_a je součinitel zohledňující vliv prostředí (vlhkosti), stanovený dle tab. 4.1 v [3], viz kap. 2.3.2.3,

γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže, pro MSÚ stanoven hodnotou 1,5.

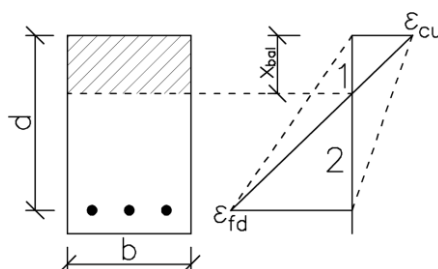
Koeficient 0,9 v (2.68) zavádí snížení mezního přetvoření pro ohýbaný prvek oproti standardnímu tahovému namáhání.

2.1.3.2 Ohybová únosnost prvku

K porušení prvku dochází, když je dosaženo mezního přetvoření některého z použitých materiálů. Z obr. 2.19 je patrné dvojí možné porušení prvku v závislosti na poloze neutrální osy. Pokud je vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje průřezu x menší než balanční vzdálenost x_{bal} , dosahuje poměrné přetvoření výztuže ε_f své mezní hodnoty ε_{fd} a dochází k porušení přetržením výztuže (oblast 1). V opačném případě dochází k drcení betonu při dosažení mezního přetvoření v krajních vláknech ε_{cu} (oblast 2). Z předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci (obr. 2.19) je vyjádřen vztah pro určení balanční polohy neutrální osy

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} d, \quad (2.69)$$

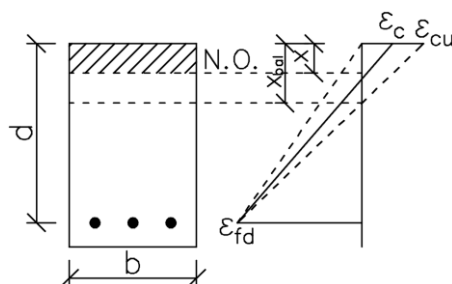
kde d je účinná výška průřezu.



Obr. 2.19 Oblasti porušení ohýbaného prvku [3]

Porušení způsobené přetržením FRP výztuže je iniciováno dosažením návrhového mezního přetvoření ve výztuži. Každý průběh přetvoření odpovídající tomuto druhu porušení má pevný bod v hodnotě mezního přetvoření FRP výztuže ε_{fd} . Pokud je výztuž

rozdělena do více vrstev, dosažení hodnoty ε_{fd} ve vrstvě nejdále k neutrální ose je rozhodující.



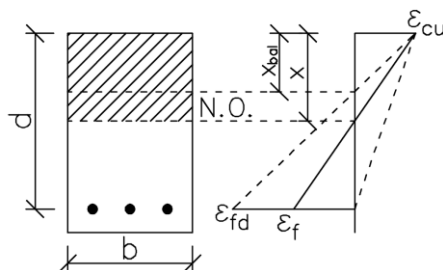
Obr. 2.20 Porušení prvku způsobené přetržením výztuže

Z předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci lze odvodit vztah pro výpočet dosaženého přetvoření krajních tlačných vláken ε_c

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{fd} \frac{x}{(d-x)} \leq \varepsilon_{cu}. \quad (2.70)$$

Pokud platí nerovnost $x > x_{bal}$, dochází k drcení betonu. V tomto případě je dosaženo mezního přetvoření betonu ε_{cu} . Předpoklad o rovinnosti průřezu po deformaci umožňuje stanovit přetvoření FRP výztuže ε_f

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \leq \varepsilon_{fd}. \quad (2.71)$$



Obr. 2.21 Porušení prvku způsobené drcením betonu

Pro oba druhy porušení lze polohu neutrální osy určit na základně rovnováhy sil na průřezu

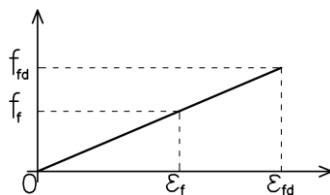
$$N_c - N_f = 0, \quad (2.72)$$

kde N_c a N_f reprezentují tlakovou, respektive tahovou sílu v betonu a FRP výztuži.

Moment únosnosti M_{Rd} lze stanovit jako součet momentů působících k těžištní ose pro tlakovou a tahovou sílu.

Z lineárně pružného chování FRP výztuží lze stanovit hodnotu napětí ve výztuži f_f součinem poměrného přetvoření ε_f a modulu pružnosti E_f .

$$f_f = \varepsilon_f E_f. \quad (2.73)$$



Obr. 2.22 Pracovní diagram FRP výztuže

2.1.3.3 Minimální plocha výztuže

Minimální plocha podélné tahové výztuže by měla být taková, aby výsledný moment únosnosti splňoval podmínku

$$M_{Rd} = 1,5M_{cr}, \quad (2.74)$$

kde M_{cr} je moment na mezi vzniku trhlin.

Pro prvky nevyžadující smykovou výztuž je dostatečná plocha podélné tahové výztuže A_f stanovena

$$\rho_l = \frac{A_f}{b d} \geq 0,01, \quad (2.75)$$

kde b je šířka průřezu.

2.1.4 fib Bulletin No. 40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4]

2.1.4.1 Vlastnosti průřezu

Analýza průřezu železobetonového prvku je běžně založena na dvou základních předpokladech: a) průřez zůstává rovinný i po deformaci a b) existuje dokonalá soudržnost mezi betonem a výztuží, což zabezpečuje kompatibilitu přetvoření obou materiálů. Tyto předpoklady je možné použít i při analýze prvků s FRP výztuží. Při porušení soudržnosti mezi výztuží a okolním betonem však nemusí tyto předpoklady platit. Tudíž by měly být uvažovány pouze u typů FRP výztuží s adekvátními vlastnostmi v soudržnosti.

2.1.4.2 Chování prvku vyztuženého FRP výztuží při ohybu

Z důvodu vysoké pevnosti FRP výztuží, která je běžně vyšší než pevnost ocelových, se poloha neutrální osy nachází velmi blízko tlačnému okraji průřezu.

K porušení prvku dochází buď drcením betonu v tlačené části průřezu, nebo přetržením výztuže. Tahové porušení tak závisí na typu FRP výztuže, ale i soudržnostních charakteristikách. V betonu vystavenému tahovému napětí se tvoří trhliny a FRP výztuž zde působí proti vytváření a rozevírání nových trhlin. Vznikají tak velké rozdíly v tuhosti mezi průřezem porušeným a neporušeným trhlinou a tudíž je i napětí ve výztuží

v porušené a neporušené části podstatně rozdílné. To vede ke vzniku velkých povrchových smykových napětí, což způsobuje vytvoření vysokých požadavků na soudržnost, a může mít též za následek nadměrné prokluzu v oblasti trhlin.

2.1.4.3 Množství podélné výztuže pro balanční porušení

Stejně jako některé zahraniční normy [1] a [2], tak i tato příručka uvádí výpočet balančního stupně vyztužení ρ_{fb} . Balanční stupeň vyztužení odpovídá takovému množství podélné výztuže, při kterém dochází k současnému porušení drcením betonu a přetržením výztuže. Porovnáním skutečného stupně vyztužení ρ_f s balančním lze stanovit způsob porušení prvku. Pro výpočet ρ_{fb} je uveden vztah (2.76) odvozený z EC2 [6] dle Pilakoutase

$$\rho_{fb} = \frac{0,81(f_{ck}+8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk}\left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}}+\varepsilon_{cu}\right)}, \quad (2.76)$$

kde f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku,

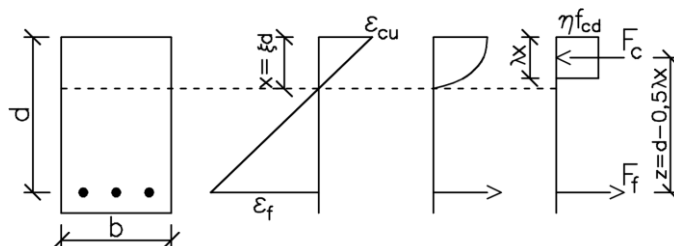
f_{fk} je charakteristická pevnost FRP výztuže v tahu,

E_{fk} je modul pružnosti FRP výztuže,

ε_{cu} je mezní přetvoření betonu v tlaku.

2.1.4.4 Stanovení momentu únosnosti

Moment únosnosti lze určit s využitím postupu dle EC2 [6]. Únosnost FRP výztuže v tlaku by neměla být ve výpočtu uvažována.



Obr. 2.23 Nahrazení napětí v tlačeném betonu náhradním obdélníkem [4]

Pokud nastává případ, kdy je množství podélné výztuže, vyjádřené pomocí stupně vyztužení ρ_f , větší než balanční ρ_{fb} , je předpokládáno porušení průřezu drcením betonu a moment na mezi únosnosti M_u je možné vypočítat z podmínky rovnováhy sil dle vztahu

$$M_u = F_c z, \quad (2.77)$$

kde F_c je síla v tlačené části průřezu,

z je rameno vnitřních sil.

Dle [6] je síla F_c určena vztahem

$$F_c = \eta f_{cd} b \lambda x, \quad (2.78)$$

kde x je vzdálenost neutrální osy od krajních tlačných vláken průřezu,

b je šířka průřezu,

η je součinitel tlakové pevnosti betonu,

λ je součinitel definující efektivní výšku tlačné oblasti betonu,

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 0,8 \\ \eta &= 1,0 \end{aligned} \right\} \text{pro } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 0,8 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{400} \right) \\ \eta &= 1,0 - \left(\frac{f_{ck} - 50}{200} \right) \end{aligned} \right\} \text{pro } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}, \quad (2.79)$$

f_{cd} je návrhová válcová pevnost betonu v tlaku vyjádřená vztahem

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}, \quad (2.80)$$

kde f_{ck} je charakteristická válcová pevnost betonu v tlaku,

α_{cc} je součinitel uvažující dlouhodobé účinky na tlakovou pevnost betonu,

γ_c je součinitel spolehlivosti betonu.

Rameno vnitřních sil z je možné určit dle (Obr. 2.23) vztahem

$$z = d - \frac{\lambda x}{2}, \quad (2.81)$$

kde d je účinná výška.

Dosazením vztahů (2.78) a (2.81) do (2.77) je možné určit vztah pro výpočet momentu únosnosti

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left(1 - \frac{\lambda \xi}{2} \right), \quad (2.82)$$

kde ξ je poměrná výška tlačné části průřezu určená za předpokladu lineárního průběhu přetvoření dle vztahu

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}}, \quad (2.83)$$

kde ε_{cu} je mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku,

ε_f je poměrné přetvoření FRP výztuže.

Výchozí předpoklad pro stanovení polohy neutrální osy při prostém ohybu je rovnováha sil na průřezu

$$F_C = F_T, \quad (2.84)$$

$$\lambda x b f_{cd} = A_f f_f, \quad (2.85)$$

kde f_f je napětí v FRP výztuži při dosaženém přetvoření ε_f .

Také platí předpoklad o lineárním průběhu přetvoření

$$x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\frac{f_f}{E_f} + \varepsilon_{cu}} d, \quad (2.86)$$

kde E_f je modul pružnosti FRP výztuže.

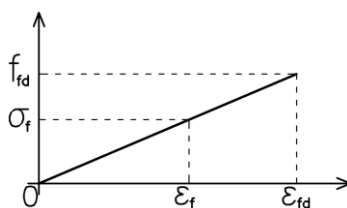
Dosazením (2.86) do vztahu (2.85) získáme kvadratickou rovnici, jejíž jeden kořen lze vyčíslit dle vztahu

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu}}{\gamma_c\rho_f E_f}}}{2}. \quad (2.87)$$

Vztah (2.87) je možné použít pro výpočet přetvoření výztuže a poté k ověření, že výsledné napětí nepřekročí pevnost FRP výztuže v tahu

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f < \frac{f_{fk}}{\gamma_f}, \quad (2.88)$$

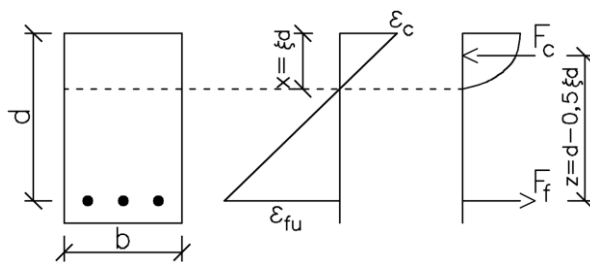
kde γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže, který je pro všechny typy vláken roven 1,25.



Obr. 2.24 Pracovní diagram FRP výztuže

Pokud je stupeň vyztužení nižší než balanční, dochází k porušení přetržením výztuže. Při stanovení momentu únosnosti M_u je nutné stanovit přetvoření krajních tlačенých vláken betonu ε_c . To lze určit iteračním procesem při řešení rovnic (2.90) a (2.91). Moment na mezi únosnosti M_u je možné vypočítat dle vztahu

$$M_u = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \left(d - \frac{\xi d}{2} \right), \quad (2.89)$$



Obr. 2.25 Rovnováha sil na průřezu

Obdobně jako v případě porušení přetržením výztuže lze určit poměrnou výšku tlačené oblasti

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c}, \quad (2.90)$$

kde ε_c je poměrné přetvoření v krajních tlačných vláknech průřezu.

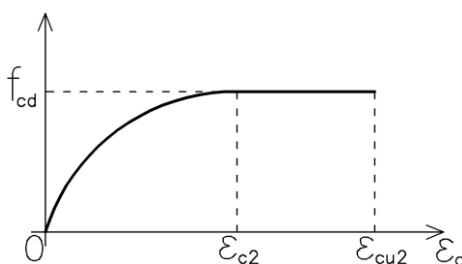
Z předpokladu o rovnováze sil na průřezu je nutné stanovit výšku tlačené části průřezu tak, aby se síla v tlačené části průřezu rovnala síle v tažené FRP výztuži. Jelikož závisí hodnota napětí v betonu f_c na dosaženém poměrném přetvoření krajních vláken ε_c , je toto napětí vypočteno pomocí jednobodové integrace plochy pod pracovním diagramem betonu v tlaku

$$F_C = F_T \rightarrow b d \xi \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_c} = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f}, \quad (2.91)$$

kde f_c je napětí v betonu vyjádřené dle vztahů pro parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu

$$f_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}, \quad (2.89)$$

$$f_c = f_{cd} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}. \quad (2.90)$$



Obr. 2.26 Parabolicko-rektangulární pracovní diagram [8]

K zabezpečení, že je moment únosnosti větší než moment na mezi vzniku trhlin, byl zaveden požadavek na minimální plochu podélné výztuže $A_{f,min}$. Vztah přejatý z EC2 [6] zní

$$A_{f,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{fk}} bd \geq 0,0013bd, \quad (2.91)$$

kde f_{ctm} je pevnost betonu v tahu.

2.1.4.5 Působení FRP výztuží v tlaku

Pevnost FRP výztuže v tlaku je nižší než ocelové výztuže. Tudiž by měla být při výpočtu zanedbána.

2.1.4.6 Působení FRP výztuží v tahu

Chování prvku vyztuženého FRP výztuží je ovlivněno efektem tahového zpevnění betonu, tj. schopnost betonu přenášet napětí mezi vytvořenými trhlinami. Pevnost betonu a stupeň vyztužení mají přímý vliv na tahové zpevnění betonu. Správné stanovení tahového zpevnění betonu je tedy důležité pro korektní predikci celkového tahového chování prvku vyztuženého FRP výztuží.

2.1.5 Numerický příklad na výpočet krátkodobé únosnosti při prostém ohybu

2.1.5.1 Materiálové charakteristiky

2.1.5.1.1 GFRP výztuž

$f_{fu}^* (f_{fu}) = 630 \text{ MPa}$ počáteční pevnost FRP výztuže v tahu

$\varepsilon_{fu}^* (\varepsilon_{fu}) = 15,75 \text{ ‰}$ mezní přetvoření FRP výztuže

$E_f = 40 \text{ GPa}$ modul pružnosti FRP výztuže

2.1.5.1.2 Beton

$f_c' (f_{ck}) = 30 \text{ MPa}$ pevnost betonu v tlaku

2.1.5.2 Průřezové charakteristiky

$h = 0,6 \text{ m}$ výška průřezu

$b = 0,32 \text{ m}$ šířka průřezu

$A = 0,192 \text{ m}^2$ plocha průřezu

$c = 30 \text{ mm}$ krytí výztuže

$d_b = 16 \text{ mm}$ průměr výztuže

$d_{\text{shear}} = 10 \text{ mm}$ průměr třmínku

$d = 0,552 \text{ m}$ účinná výška

$A_{f,1} = 7,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ plocha výztuže

2.1.5.3 Výpočet momentu únosnosti dle ACI 440.1R-06 [1]

návrhová pevnost FRP výztuže v tahu

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0,8 \times 630 = 504 \text{ MPa}$$

$$C_E = 0,8 \text{ (kap. 2.3.2.1)}$$

stupeň vyztužení

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d} = \frac{7,92 \times 10^{-4}}{0,32 \times 0,552} = 0,00448$$

balanční stupeň vyztužení

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f_c'}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0,85 \frac{30}{504} 0,85 \frac{40 \times 10^3 \times 0,003}{40 \times 10^3 \times 0,003 + 504} = 0,00827$$

$$\beta_1 = 0,85$$

$$\rho_f < \rho_{fb} \Rightarrow \text{dochází k tahovému porušení}$$

moment únosnosti

$$\begin{aligned} \phi M_n &= \phi A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) = \\ &= 0,55 \times 7,92 \times 10^{-4} \times 504 \times 10^3 \left(0,552 - \frac{0,85 \times 0,106}{2} \right) = \\ &= 0,55 \times 202,33 \text{ kNm} = \mathbf{111,28 \text{ kNm}} \end{aligned}$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d = \left(\frac{0,003}{0,003 + 0,0126} \right) 0,552 = 0,106 \text{ m}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0,8 \times 0,01575 = 0,0126$$

2.1.5.4 Výpočet momentu únosnosti dle ISIS Canada [2]

stupeň vyztužení

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d} = \frac{7,92 \times 10^{-4}}{0,32 \times 0,552} = 0,00448$$

balanční stupeň vyztužení

$$\begin{aligned} \rho_{frpb} &= \alpha_1 \beta_1 \frac{\phi_c}{\phi_{frp}} \frac{f'_c}{f_{frpu}} \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{frpu}} \right) = \\ &= 0,805 \times 0,895 \frac{0,65}{0,75} \times \frac{30}{630} \left(\frac{0,0035}{0,0035 + 0,01575} \right) = 0,00541 \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c = 0,805 \geq 0,67$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c = 0,895 \geq 0,67$$

$$\rho_f < \rho_{fb} \Rightarrow \text{dochází k tahovému porušení}$$

výška tlačené části průřezu

$$c = 0,080452 \text{ m (volí se iteračně)}$$

přetvoření krajních tlačných vláken průřezu

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{frpu} \frac{c}{d - c} = 0,01575 \frac{0,080452}{0,552 - 0,080452} = 0,00267$$

síla v tlačené části průřezu

$$C = \alpha \phi_c f'_c \beta c b = 0,926 \times 0,65 \times 30 \times 0,805 \times 0,0805 \times 0,32 = 374,22 \text{ kN}$$

$$\alpha = 0,926 \text{ (tab. B.1 v ISIS Canada [2])}$$

$$\beta = 0,805 \text{ (tab. B.1 v ISIS Canada [2])}$$

síla v tažené FRP výztuži

$$\begin{aligned} T &= A_{frp} \phi_f \varepsilon_{frpu} E_{frp} = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,75 \times 0,01575 \times 40 \times 10^6 = \\ &= 374,22 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$C \cong T$$

moment na mezi únosnosti

$$M_r = T \left(d - \frac{\beta c}{2} \right) = 374,22 \left(0,552 - \frac{0,805 \times 0,0805}{2} \right) = 195,45 \text{ kNm}$$

2.1.5.5 Výpočet momentu únosnosti dle CNR-DT 203/2006 [3]

návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže

$$\varepsilon_{fd} = 0,9 \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = 0,9 \times 0,8 \times \frac{0,01575}{1,5} = 0,00756$$

výška tlačené části průřezu při balančním stupni porušení

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00756} 0,552 = 0,175 \text{ m}$$

síla v tlačené části průřezu při $x = x_{bal}$

$$F_C = \lambda x b f_{cd} = 0,8 \times 0,175 \times 0,32 \times \frac{30}{1,5} \times 10^3 = 896 \text{ kN}$$

síla v tažené FRP výztuži při $x = x_{bal}$

$$F_T = A_f \times \varepsilon_{fd} \times E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,00756 \times 40 \times 10^6 = 239,5 \text{ kN}$$

$$F_C \geq F_T \Rightarrow \text{není dosaženo rovnováhy sil na průřezu}$$

nutno snížit $x \Rightarrow$ tahové porušení \Rightarrow nelze použít obdélníkové rozdělení napětí v tlačené části průřezu (použít parabolickou-rektangulární pracovní diagram)

přetvoření krajních tlačných vláken průřezu

$$\varepsilon_c = 0,00122 \text{ (volí se iteračně)}$$

součinitel α (kap. 3.1.2)

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_c} = \frac{0,00122}{0,002} - \frac{0,00122^2}{3 \times 0,00122} = 0,486$$

výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} d = \frac{0,00122}{0,00756 + 0,00122} 0,552 = 0,077 \text{ m}$$

síla v tlačené části průřezu

$$F_C = \alpha x b f_{cd} = 0,486 \times 0,077 \times 0,32 \times \frac{30}{1,5} \times 10^3 = 239,5 \text{ kN}$$

síla v tažené FRP výztuži

$$F_T = A_f \times \varepsilon_{fd} \times E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,00756 \times 40 \times 10^6 = 239,5 \text{ kN}$$

$$F_C \cong F_T$$

moment na mezi únosnosti

$$M_{Rd} = F_T \left(d - \frac{\alpha x}{2} \right) = 239,5 \left(0,552 - \frac{0,486 \times 0,077}{2} \right) = 127,22 \text{ kNm}$$

2.1.5.6 Výpočet momentu únosnosti dle fib Bulletin No. 40 [4]

návrhová hodnota mezního poměrného přetvoření FRP výztuže

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = \frac{0,01575}{1,25} = 0,0126$$

výška tlačené části průřezu při balančním stupni porušení

$$x_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fd}} d = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,0126} 0,552 = 0,12 \text{ m}$$

síla v tlačené části průřezu při $x = x_{bal}$

$$F_C = \lambda x b f_{cd} = 0,8 \times 0,12 \times 0,32 \times \frac{30}{1,5} \times 10^3 = 614,4 \text{ kN}$$

síla v tažené FRP výztuži při $x = x_{bal}$

$$F_T = A_f \times \varepsilon_{fd} \times E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,0126 \times 40 \times 10^6 = 399,2 \text{ kN}$$

$$F_C \geq F_T \Rightarrow \text{není dosaženo rovnováhy sil na průřezu}$$

nutno snížit $x \Rightarrow$ tahové porušení \Rightarrow nelze použít obdélníkové rozdělení napětí v tlačené části průřezu (použít parabolickou-rektangulární pracovní diagram)

přetvoření krajních tlačných vláken průřezu

$$\varepsilon_c = 0,0023566 \text{ (volí se iteračně)}$$

součinitel α (kap. 3.1.2)

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} = 1 - \frac{0,002}{3 \times 0,0023566} = 0,717$$

výška tlačené části průřezu

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fd} + \varepsilon_c} d = \frac{0,0023566}{0,0126 + 0,0023566} 0,552 = 0,087 \text{ m}$$

síla v tlačené části průřezu

$$F_C = \alpha x b f_{cd} = 0,717 \times 0,087 \times 0,32 \times \frac{30}{1,5} \times 10^3 = 399,2 \text{ kN}$$

síla v tažené FRP výztuži

$$F_T = A_f \times \varepsilon_{fd} \times E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,0126 \times 40 \times 10^6 = 399,2 \text{ kN}$$

$$F_C \cong F_T$$

moment na mezi únosnosti

$$\mathbf{M_{Rd}} = F_T \left(d - \frac{\alpha x}{2} \right) = 399,2 \left(0,552 - \frac{0,717 \times 0,087}{2} \right) = \mathbf{207,91 \text{ kNm}}$$

2.2 Průřez namáhaný posouvající silou

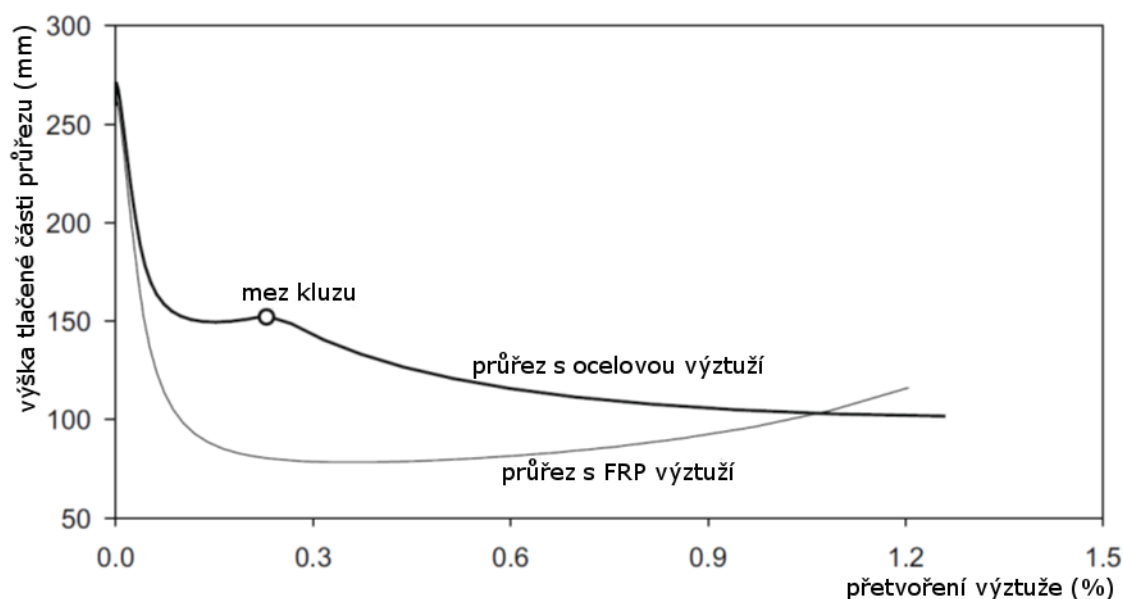
Chování vyztuženého betonu ve smyku je komplexní jev, který závisí na příspěvku jednotlivých částí vnitřního mechanismu přenosu, jejich velikosti a vzájemné kombinaci. Smyková únosnost prvku je převážně ovlivněna příspěvkem tlačené části betonového průřezu, hmoždinkovým účinkem kameniva, hmoždinkovým účinkem podélné výztuže, případně smykovou výztuží. Příspěvek všech těchto základních mechanismů na smykové únosnosti prvku nezávisí nejen na vlastnostech betonu, ale i na mechanických charakteristikách výztužného materiálu a přirozené interakci mezi betonem a výztuží.

2.2.1 Vliv mechanických vlastností FRP výztuží na místní přenos smykového namáhání

Mechanické vlastnosti FRP výztuží ovlivňují způsob přenosu smykového namáhání na prvek. Absence plastického chování FRP výztuže vždy vede ke křehkému porušení a tudíž ve výpočtu nelze uvažovat s redistribucí napětí na konstrukci. Dále musí být bráno v úvahu anizotropní chování kompozitních výztuží. Vyšetřeno tak musí být působení výztuže při kombinaci podélných a příčných sil, což je v případě smykové výztuže velice důležité.

2.2.1.1 Přenos smykového napětí tlačnou částí průřezu

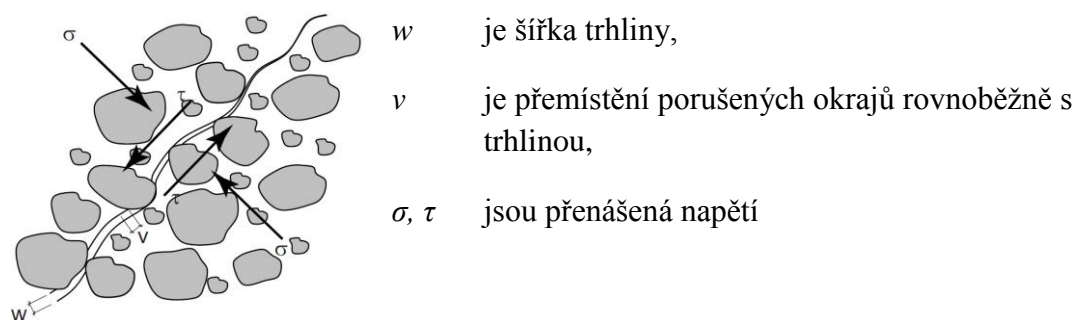
U prvků z vyztuženého betonu hraje výška tlačené části průřezu podstatnou roli při stanovení smykové únosnosti, ale ta je vysoce závislá i na vlastnostech podélné výztuže. Dá se tedy očekávat, že smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží bude odlišná od železobetonového. Závislost výšky tlačené části průřezu na přetvoření podélné výztuže je znázorněna na Obr. 2.27. Z tohoto obrázku je zřejmé, že u prvků s FRP výztuží je plocha tlačené části průřezu po vytvoření trhlin výrazně menší než u stejného železobetonového prvku již při relativně nízkých hodnotách zatížení. Při zvyšování přetvoření FRP výztuží se však plocha tlačené části průřezu nezmenšuje tak výrazným způsobem jako u prvku vyztuženého ocelovou výztuží. Ve skutečnosti se vlivem nelinearit mechanických vlastností betonu v tlaku plocha tlačené části průřezu při tlakovém namáhání zvyšuje a tím je v menší míře ovlivněna smyková únosnost. Smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží je tedy oproti železobetonovému menší bezprostředně po vytvoření trhliny, ale s nárůstem přetvoření podélné výztuže se snižování únosnosti projevuje v menší míře.



Obr. 2.27 Závislost polohy neutrální osy na přetvoření výztuže u prvků o stejném průřezu a ploše podélné výztuže [4]

2.2.1.2 Hmoždinkový účinek zrn kameniva

V případě, že dojde ke smykovému posunu rovnoběžnému se směrem vytvořené trhliny, je v tažené oblasti smykové napětí přenášeno přes trhlinu hmoždinkovým účinkem kameniva. U trémových prvků bez smykové výztuže je příspěvek hmoždinkového účinku kameniva na přenos smykového namáhání mezi 33% a 50% smykové únosnosti neporušené části betonového průřezu [4]. Tento příspěvek se snižuje s rostoucí šířkou trhlín.

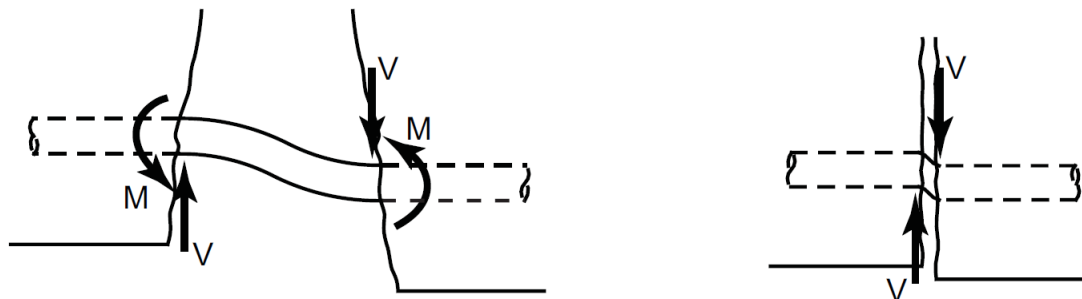


Obr. 2.28 Přenos napětí přes trhlinu vlivem hmoždinkového účinku kameniva [4]

Pokud jsou prvky vyztužené FRP výztuží, jsou z důvodu vyššího modulu pružnosti očekávány větší průhyby a širší trhliny než u železobetonového prvku. Tím pádem je prostřednictvím hmoždinkového účinku kameniva předpokládáno menší přenášení smykových napětí.

2.2.1.3 Hmoždinkový účinek výztuže

Vzhledem k velice nízké příčné tuhosti klasických FRP výztuží, je při použití FRP jako podélné výztuže příspěvek hmoždinkového účinku na přenos smyku zanedbatelný.



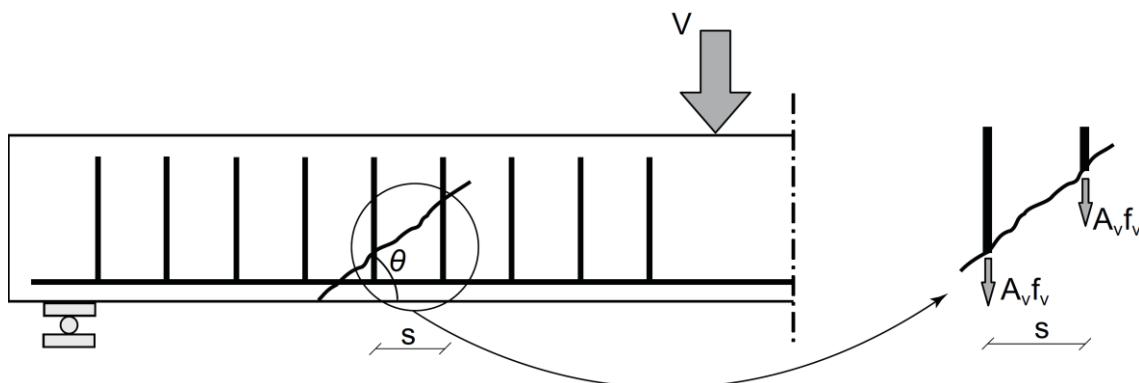
ohybová únosnost výztuže

smyková únosnost výztuže

Obr. 2.29 Hmoždinkový účinek podélné výztuže probíhající trhlinou [4]

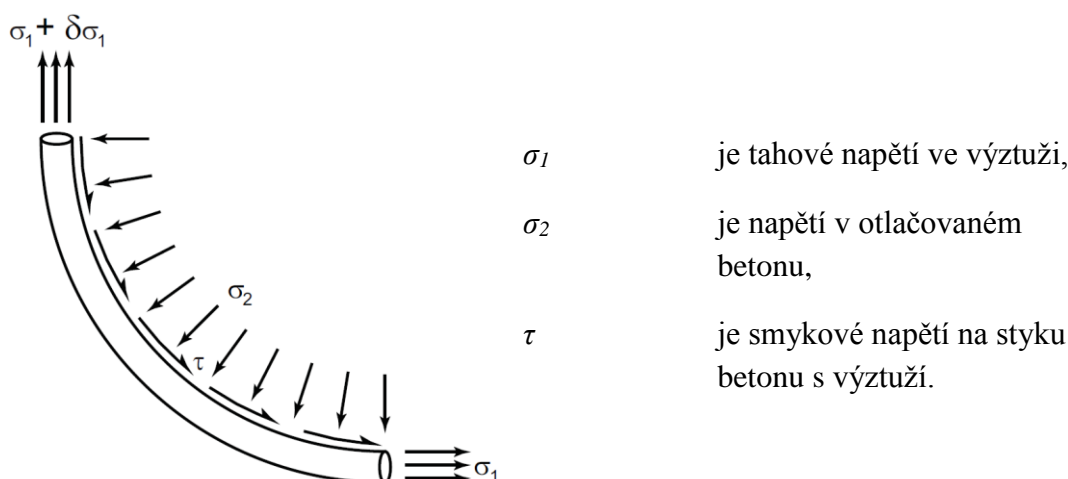
2.2.1.4 Smyková výztuž

V okamžiku, kdy zatížení překročí únosnost betonu ve smyku, musí být použita smyková výztuž. Příspěvek příčné výztuže, většinou ve formě třmínků, umožňuje přenos tahových sil přes vytvořenou smykovou trhlinu.



Obr. 2.30 Příspěvek smykové výztuže k celkové smykové únosnosti prvku [4]

Smyková výztuž je využita pouze pro přenos tahových sil a podíl její únosnosti na celkové smykové únosnosti prvku závisí na maximálním napětí, které dokáže výztuž přenést. V případě ocelové výztuže je toto napětí rovno napětí na mezi kluzu výztuže. Tahová únosnost FRP výztuže je výrazně omezena při působení kombinace normálových a smykových napětí. V důsledku toho je předpokládáno porušení v místě ohybů, pokud je výztuž vystavená vysokým napětím. Redukce únosnosti, vyskytující se v ohybech výztuží, závisí na poměru délky ohybu k poloměru ohybu, typu kompozitu, vlastnostech v soudržnosti a typu kotvení. Z tohoto důvodu je v [4] doporučeno použít maximální pevnost rovnou 40 % až 50 % jednoosé pevnosti FRP výztuže.



Obr. 2.31 Schéma působení napětí v zahnuté části výztuže obalené betonem [4]

2.2.2 Způsoby smykového porušení prvků s FRP výztuží

Porušení prvku z vyztuženého betonu vždy předchází vytvoření smykových trhlin. Vytvoření smykových trhlin mění vnitřní chování prvku a k porušení následně dochází současně s vytvářením nových trhlin, zvětšováním stávajících trhlin nebo po zvýšení působícího zatížení. Porušení prvku s FRP výztuží může nastat kromě porušení typického pro běžné železobetonové prvky (příčné tahové porušení nebo tlakové porušení) i přetržením výztuže. Smykové porušení drcením tlačných betonových vzpěr je mechanismus porušení závislý pouze na charakteristikách betonu a tudíž je postup výpočtu daný normami pro železobeton platný i pro prvky s FRP výztuží.

2.2.3 Přístupy k návrhu prvků při smykovém namáhání

Chování prvku namáhaného smykem lze velice dobře popsat použitím příhradové analogie. Uvažovat redistribuci napětí je však v případě FRP výztuží nevhodné z důvodu jejího křehkého chování. Objevil se názor (Stratford, T. and Burgoyne, C., 2003 podle fib Bulletin No. 40 [4]), podle kterého návrhový postup používaný pro železobetonové prvky, závisející na redistribuci napětí a založený na teorii plasticity, nemusí být bezpečně aplikovatelný na prvky s FRP výztuží. Nicméně již existují důkazy např. (Maruyama, K., and Zhao, W., 1996 podle fib Bulletin No. 40 [4]), které za předpokladu, že jsou smykové trhliny efektivně řízeny a jednotlivé smykové únosnosti betonu a výztuže jsou efektivně mobilizovány, umožňují používat přístup, kdy je příspěvek těchto dvou mechanismů jednoduše sečten. Experimentální testy pro trámy např. (Maruyama, K., and Zhao, W., 1996 podle fib Bulletin No. 40 [4]) a desky (Ospina, C.E., 2003 podle fib Bulletin No. 40 [4]) prokázaly, že smyková únosnost prvků s FRP výztuží může být určena za pomoci postupu odvozeného z výpočtu smykové únosnosti železobetonového prvku. Musí být ale přihlédnuto k nižším tuhostem různých typů FRP výztuží oproti oceli.

2.2.4 Podstata návrhu

Základní princip založený na existujících doporučeních pro návrh prvků s FRP výztuží je předpoklad soudržnosti mezi betonem a výztuží. Betonová část průřezu vyvozuje síly a přetvoření, které jsou nezávislé na typu použité podélné výztuže. Proto pokud je při návrhu uvažováno stejné přetvoření podélné výztuže ($\varepsilon_f = \varepsilon_s$) a jsou uvažovány stejné návrhové síly ($F_f = F_s$), vede návrh na stejně bezpečný návrh jako v případě použití ocelové výztuže. Sílu působící ve výztuži lze tedy zapsat

$$F_f = \varepsilon_f E_f A_f = \varepsilon_s E_s A_s = F_s, \quad (2.92)$$

kde F_f je síla v podélné FRP výztuži,

F_s je síla v podélné ocelové výztuži,

ε_f je přetvoření podélné FRP výztuže,

ε_s je přetvoření podélné ocelové výztuže,

E_f je modul pružnosti FRP výztuže,

E_s je modul pružnosti ocelové výztuže,

A_f je plocha podélné FRP výztuže,

A_s je plocha podélné ocelové výztuže.

Ve výpočtu je možno uvažovat náhradní plochu výztuže A_e , určenou za předpokladu $\varepsilon_f = \varepsilon_s$, z poměru modulů pružnosti obou materiálů

$$A_e = A_f \frac{E_f}{E_s}. \quad (2.93)$$

Při návrhu lze použít tuto náhradní plochu výztuže nebo zavést podobnou korekční podmínku, která zohledňuje různé normálové tuhosti ohybové výztuže, z důvodu posouzení smykové únosnosti betonu.

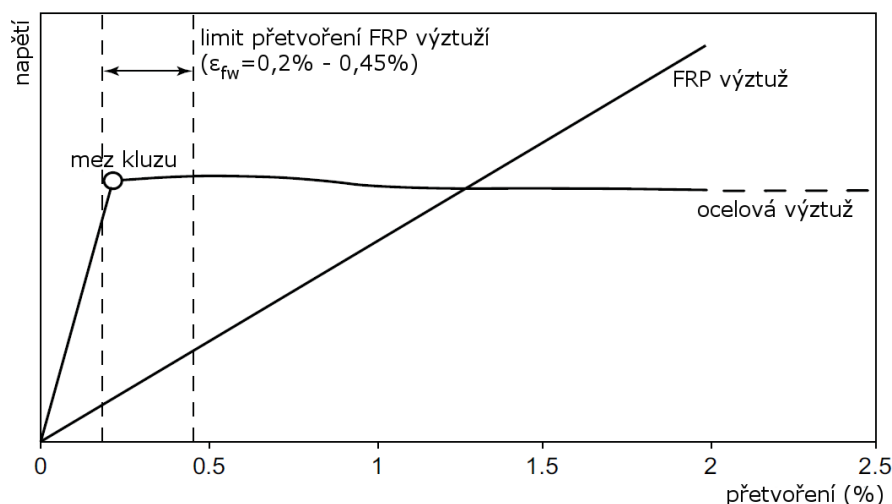
Množství potřebné smykové výztuže je závislé na hodnotě uvažovaného maximálního přetvoření ε_{fw} této výztuže. Prvotní doporučení pro návrh bylo uvažovat maximální přetvoření FRP výztuže ε_{fw} shodné s mezí kluzu ocelové výztuže (mezi 2 ‰ – 2,5 ‰), zejména z důvodu zachování celistvosti průřezu po vytvoření smykových trhlin. Dle [4] však v současnosti probíhá proces zavádění méně konzervativního přístupu. Ten spočívá v uvažování vyšší hodnoty maximálního poměrného přetvoření smykové FRP výztuže, které více odpovídá skutečnému chování prvku vyztuženého tímto druhem výztuže (Obr. 2.32).

S využitím pružného chování FRP výztuží až do porušení je dán vztah pro výpočet napětí ve výztuži

$$f_{fw} = \varepsilon_{fw} E_{fw}, \quad (2.94)$$

kde f_{fw} je napětí ve smykové FRP výztuži,

E_{fw} je modul pružnosti FRP výztuže.



Obr.2.32 Limitní přetvoření smykové FRP výztuže uvažováno v současných normách[4]

2.2.5 Smyková únosnost trémových prvků s FRP výztuží

2.2.5.1 Návrhový postup dle ACI 440.1R-06 [1]

2.2.5.1.1 Stanovení smykové únosnosti

Podle ACI 318-05 [5] je návrhová smyková únosnost železobetonového prvku V_n definována jako součet smykové únosnosti betonu V_c a ocelové výztuže V_s . Postup návrhu prvku s FRP výztuží je upraven tak, aby vystihoval rozdílné vlastnosti oceli a FRP výztuže.

Smyková únosnost betonu V_c ohýbaných prvků s podélnou FRP výztuží lze vyjádřit vzorcem z [5]

$$V_c^* = 5\sqrt{f_c'^*} b_w^* c^*, \quad (2.95)$$

kde V_c^* je smyková únosnost betonu v Angloamerické měrné soustavě jednotek,

$f_c'^*$ je pevnost betonu v tlaku v Angloamerické měrné soustavě jednotek,

b_w^* je šířka průřezu v Angloamerické měrné soustavě jednotek,

c^* je poloha neutrální osy trhlinou porušeného průřezu v Angloamerické měrné soustavě jednotek.

Po převedení na jednotky SI

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c, \quad (2.96)$$

kde f'_c je pevnost betonu v tlaku,

b_w je šířka průřezu,

c je poloha neutrální osy trhlinou porušeného průřezu.

Pro prvky s výztuží umístěnou pouze u taženého okraje průřezu je možno polohu neutrální osy stanovit

$$c = kd, \quad (2.97)$$

kde d je účinná výška průřezu,

k je součinitel pro výpočet výšky tlačené části průřezu

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f, \quad (2.98)$$

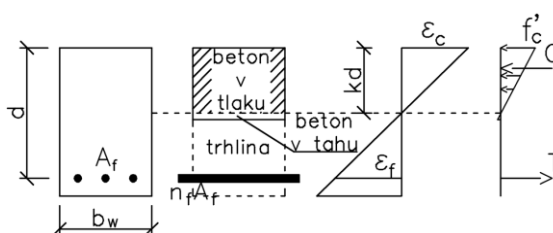
kde ρ_f je stupeň vyztužení určený vztahem

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d}, \quad (2.99)$$

n_f je pracovní součinitel dle vztahu

$$n_f = \frac{E_f}{E_c}, \quad (2.100)$$

kde E_c je modul pružnosti betonu.



Obr. 2.33 Průřez porušený trhlinou

Vzorec (2.96) pro jednotky SI lze rozepsat do tvaru, ve kterém vynikne podobnost se vztahem pro železobeton z normy ACI 318-05 [5], kde je jediným rozdílem absence členu $(12/5k)$

$$V_c = \left(\frac{12}{5}k\right) 0,167 \sqrt{f'_c} b_w d. \quad (2.101)$$

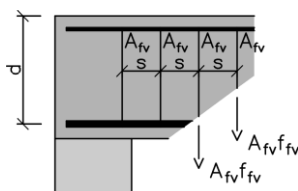
Při určení smykové únosnosti třmínků V_f lze též postupovat pomocí vztahu pro ocelovou výztuž

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s}, \quad (2.102)$$

kde A_{fv} je plocha jednoho třmínku,

f_{fv} je napětí ve smykové FRP výztuži,

s je podélná vzdálenost třmínků.



Obr. 2.34 Síly působící v jednotlivých třmíncích

Napětí ve výztuži musí být omezeno z důvodu omezení šířky smykových trhlin, zachování celistvosti průřezu a snížené pevnosti FRP výztuží v místech ohybů

$$f_{fv} = 0,004 E_f \leq f_{fb}, \quad (2.103)$$

kde f_{fb} je návrhová pevnost FRP výztuže v tahu za ohybu určená dle vztahu (2.6).

Při použití třmínků kolmých k těžištní ose, je požadovaná plocha smykové výztuže stanovena

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{fv} d}, \quad (2.104)$$

kde V_u je návrhová hodnota posouvající síly,

ϕ je redukční faktor únosnosti roven hodnotě 0,75 pro smyk a kroucení.

Jsou-li použity nakloněné třmínky, je do vztahu pro výpočet smykové únosnosti zahrnut úhel odklonu třmínků α

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} (\sin \alpha + \cos \alpha). \quad (2.105)$$

Pokud je jako smyková výztuž použita spirála, je smyková únosnost určena vztahem

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \sin \alpha, \quad (2.106)$$

kde s je stoupání spirály,

α je úhel odklonu.

2.2.5.1.2 Minimální plocha smykové výztuže

Z doporučení dle ACI 318-05 [5] vyplývá nutnost dodržení minimální plochy smykové výztuže, pokud návrhová posouvající síla V_u překročí hodnotu $\phi V_c/2$. Tento předpoklad je nutné dodržet z důvodu náhlého vytvoření smykových trhlin. Křehkému smykovému porušení by mělo být zabráněno dostatečnou rezervou v únosnosti. Toho lze dosáhnout stanovením minimální plochy výztuže $A_{fv,min}$ dle vztahu

$$A_{fv,min}^* = \frac{50b_w s^*}{f_{fv}^*}, \quad (2.107)$$

kde $A_{fv,min}^*$ je minimální plocha jednoho třmínku v Angloamerické měrné soustavě jednotek,

s^* je podélná vzdálenost třmínků v Angloamerické měrné soustavě jednotek,

f_{fv}^* je napětí ve smykové FRP výztuži v Angloamerické měrné soustavě jednotek.

Vztah použitelný pro dosazení v jednotkách SI

$$A_{fv,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{fv}}, \quad (2.108)$$

kde šířka prvku b_w a podélná vzdálenost třmínků s se dosazují v milimetrech a napětí ve výztuži f_{fv} v megapascálech.

2.2.5.1.3 Konstrukční zásady

Požadavek na maximální vzdálenost prutů smykové výztuže s_{max} zabezpečuje, že každá smyková trhlina je zachycena minimálně jedním třmínkem.

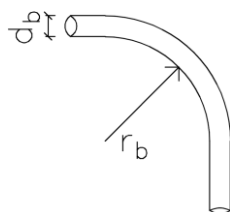
$$s_{max} = \min \left\{ \frac{d}{2}; 24 \text{ in} \approx 600 \text{ mm} \right\}. \quad (2.109)$$

Z anizotropních vlastností FRP výztuží je patrné, že poloměr ohybů má zásadní vliv na výslednou únosnost. Pruty s malým poměrem zakřivení ohybů se v těchto místech porušují již při velmi malých hodnotách napětí. Tudíž je nutné se velmi malým poloměrem ohybů vyhnout, i když jsou výrobně proveditelné. Minimální doporučený poloměr zakřivení musí splňovat vztah

$$\frac{r_b}{d_b} \geq 3, \quad (2.110)$$

kde r_b je poloměr ohybu,

d_b je průměr výztužného prutu.



Obr. 2.35 Označení poloměru ohybu a průměru výztuže

Třmínky z FRP výztuže by měly být uzavřeny 90° hákem.

Aby bylo zabezpečeno přenesení tahových sil z výztuže do betonu, je nutné za ohybem FRP výztuže dodržet minimální délku přesahu l_{thf} . Při délce přesahu $12d_b$ již není znatelný prokluz mezi materiály a tahová únosnost třmínku není ovlivněna, minimální délka přesahu je tedy dána touto hodnotou.



Obr. 2.36 Minimální délka přesahu třmínku

2.2.5.2 Návrhový postup dle ISIS Canada [2]

2.2.5.2.1 Stanovení smykové únosnosti

Celková únosnost FRP výztuže je výrazně ovlivněna kotevní délkou a poloměrem ohybu. Z tohoto důvodu jsou uvedeny vztahy, které stanovují maximální možnou únosnost FRP výztuží f_{frpv} uvažovanou ve výpočtu

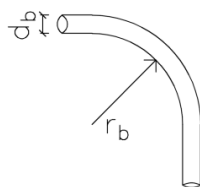
$$f_{frpv} = \left(0,4 + 0,015 \frac{l_{frpd}}{d_e} \right) f_{frpu}, \quad (2.111)$$

$$f_{frpv} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3 \right) f_{frpu}, \quad (2.112)$$

kde f_{frpu} je návrhová pevnost FRP výztuže,

r_b je poloměr ohybu,

d_b je průměr výztuže,



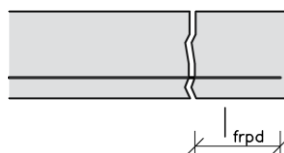
Obr. 2.37 Označení poloměru ohybu a průměru výztuže

d_e je efektivní průměr výztuže stanovený dle vztahu

$$d_e = \sqrt{\frac{4A_b}{\pi}}, \quad (2.113)$$

kde A_b je průřezová plocha prutu výztuže,

l_{frpd} je kotevní délka.



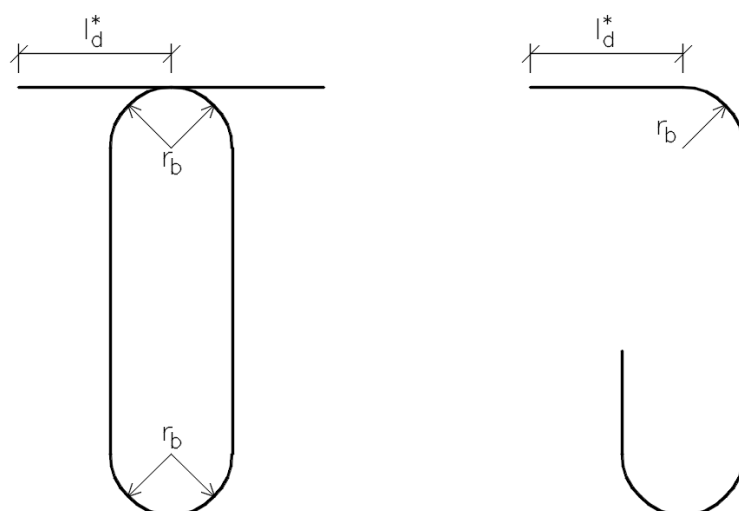
Obr. 2.38 Označení kotevní délky

Při návrhu musí být dodrženy následující zásady pro poloměry oblouků r_b a délku přesahu l_d^*

$$r_b \geq \max\{4d_e; 50 \text{ mm}\}, \quad (2.114)$$

$$l_d^* \geq \max\{6d_e; 70 \text{ mm}\}, \quad (2.115)$$

$$\frac{r_b}{d_b} \geq 3. \quad (2.116)$$



Obr. 2.39 Konstrukční zásady

Každý třmínek musí být uzavřen 90° ohybem.

2.2.5.2.2 Smyková únosnost FRP třmínků

Smyková únosnost V_{frp} založená na přístupu dle CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code, 2006 podle ISIS Canada [2]) pro prvky s příčnou FRP výztuží kolmou na podélnou těžišťovou osu je dána vztahem

$$V_{frp} = \frac{A_{frpv} \sigma_v d_v \cot \theta}{s}, \quad (2.117)$$

kde A_{frpv} je plocha smykové výztuže o vzdálenosti s (plocha jednoho třmínku),

θ je úhel odklonu třmínku vzhledem k podélné těžišťové ose,

d_v je efektivní účinná výška stanovená jako

$$d_v = 0,9d, \quad (2.118)$$

d je vzdálenost krajních tlačných vláken k těžišti tažené výztuže,

s je vzdálenost jednotlivých třmínků měřená kolmo k podélné ose prvku,

σ_v je maximální přípustné napětí v FRP výztuži dáno menší z hodnot

$$\sigma_v = \frac{(0,05 \frac{\tau_b}{d_s} + 0,3) f_{frpv}}{1,5}, \quad (2.119)$$

nebo

$$\sigma_v = E_{frpv} \varepsilon_v, \quad (2.120)$$

E_{frpv} je modul pružnosti smykové FRP výztuže,

ε_v je maximální přípustné návrhové přetvoření výztuže dáno vztahem

$$\varepsilon_v = 0,0001 \left(f_c' \frac{\rho_{frp} E_{frp}}{\rho_{frpv} E_{frpv}} \right)^{0,5} \left\{ 1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f_c'} \right) \right\} \leq 0,0025, \quad (2.121)$$

E_{frp} je modul pružnosti podélné FRP výztuže,

f_c' je pevnost betonu v tlaku,

ρ_{frp} je stupeň vyztužení průřezu podélnou výztuží dle vztahu

$$\rho_{frp} = \frac{A_{frp}}{b d}, \quad (2.122)$$

ρ_{frpv} je stupeň vyztužení průřezu smykovou výztuží dle vztahu

$$\rho_{frpv} = \frac{A_{frp,v}}{b s}, \quad (2.123)$$

σ_N je normálové napětí v podélné výztuži.

Maximální přípustné přetvoření smykové výztuže při běžném provozním zatížení je z důvodu omezení šířky smykových trhlin dáno vztahem

$$\varepsilon_{frpv,ser} = \frac{s(V_{ser}-V_c)}{A_{frpv}dE_{frpv}} \leq 0,002, \quad (2.124)$$

kde $\varepsilon_{frpv,ser}$ je přetvoření FRP třmínku při provozním zatížení,

V_{ser} je posouvající síla ve výztuži při provozním zatížení,

V_c je smyková únosnost betonu.

2.2.5.2.3 Smyková únosnost betonu

U prvků bez smykové výztuže jako jsou desky, základy a trámové prvky s účinnou výškou menší než 300 mm nebo u prvků s alespoň minimální plochou smykové výztuže, je příspěvek únosnosti betonu V_c dán vztahem

$$V_c = 0,2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}b_wd\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}}, \quad (2.125)$$

$$\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}} \leq 1,0, \quad (2.126)$$

kde λ je součinitel zohledňující hustotu betonu,

ϕ_c je součinitel odolnosti betonu,

E_s je modul pružnosti oceli,

b_w je účinná šířka prvku.

U prvků s účinnou výškou větší než 300 mm a neobsahujících alespoň minimální plochu příčné výztuže se smyková únosnost betonu stanoví vztahem

$$V_c = \left(\frac{260}{1000+d}\right)\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}b_wd\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}}, \quad (2.127)$$

$$\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}} \leq 1,0, \quad (2.128)$$

Redukce smykové únosnosti betonu u prvku s FRP výztuží v porovnání s ocelovou výztuží je uvažována z důvodu použití podélné FRP výztuže a měla by být použita bez ohledu na typ použité příčné výztuže.

2.2.5.2.4 Minimální plocha smykové výztuže

Porušení prvku bez smykové výztuže je náhlé a křehké. Tudíž je předepsána minimální plocha smykové výztuže v případě, že je návrhová posouvající síla V_f větší než $0,5V_c$. Minimální plocha výztuže je určena vztahem

$$A_{frpv} = 0,06\sqrt{f'_c} \frac{b_w s}{0,0025E_{frpv}}. \quad (2.129)$$

Minimální množství smykové výztuže vyjádřené ze vzorce (2.129) minimálním stupněm vyztužení $\rho_{frpv \min}$ je dáno vztahem

$$\rho_{frpv \min} = \frac{A_{frpv}}{b_w s} > \frac{0,06\sqrt{f'_c}}{0,0025E_{frpv}}. \quad (2.130)$$

2.2.5.2.5 Maximální vzdálenost FRP třmínků

Vzdálenost mezi třmínky s nesmí překročit maximální vzdálenost třmínků s_{max} danou vztahem

$$s_{max} = \min\{0,7d_v; 600 \text{ mm}\}. \quad (2.131)$$

2.2.5.3 Návrhový postup dle CNR-DT 203/2006 [3]

2.2.5.3.1 Stanovení smykové únosnosti

2.2.5.3.2 Prvky bez smykové výztuže

Smyková únosnost prvku s podélnou FRP výztuží V_{Rd} lze určit dle vztahu

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct}; V_{Rd,max}\}, \quad (2.132)$$

kde $V_{Rd,ct}$ je příspěvek betonu ke smykové únosnosti průřezu,

$V_{Rd,max}$ je únosnost tlačného segmentu mezi trhlinami, stanovená dle EC2 [6].

Únosnost prvku bez smykové výztuže je stanovena vztahem

$$V_{Rd,ct} = 1,3 \sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \tau_{Rd} k (1,2 + 40\rho_1) b d, \quad (2.133)$$

$$\sqrt{\frac{E_f}{E_s}} \leq 1, \quad (2.134)$$

kde E_f je modul pružnosti FRP výztuže,

E_s je modul pružnosti oceli,

τ_{Rd} je návrhové smykové napětí, definováno vztahem

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd}, \quad (2.135)$$

f_{ctd} je návrhová pevnost betonu v tahu,

k je součinitel roven 1, pokud je více než 50 % spodní výztuže přerušeno,
v ostatních případech je roven

$$k = (1,6 - d) \geq 1, \quad (2.136)$$

d je účinná výška průřezu a pro vztah (2.136) se dosazuje v metrech,

ρ_1 je stupeň vyztužení definovaný vztahem

$$\rho_1 = \frac{A_f}{b d} \leq 0,02, \quad (2.137)$$

A_f je plocha podélné výztuže.

b je šířka prvku.

2.2.5.3.3 Prvky se smykovou výztuží

Pokud je prvek vyztužen příčnou FRP výztuží, smykovou únosnost je možné určit dle vztahu

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct} + V_{Rd,f}; V_{Rd,max}\}, \quad (2.138)$$

kde $V_{Rd,f}$ je smyková únosnost příčné výztuže.

Smyková únosnost příčné výztuže je definována vztahem

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} f_{fr} d}{s}, \quad (2.139)$$

kde A_{fw} je plocha FRP třmínku v rámci vzdálenosti s (plocha jednoho třmínku),

f_{fr} je redukovaná tahová pevnost FRP výztuže,

s je podélná vzdálenost třmínků.

Redukce tahové pevnosti f_{fr} je dána snížením únosnosti v místě ohybů a lze ji vyjádřit jako

$$f_{fr} = \frac{f_{fd}}{\gamma_{f,\phi}}, \quad (2.140)$$

kde $\gamma_{f,\phi}$ je redukční součinitel nabývající hodnot:

- 2 - pokud nejsou provedeny měření, které by prokázaly, že poloměr ohybu není menší než šestnásobek průměru výztužného prvku d_b ,
- f_{fd}/f_{fb} - poměr pevnosti přímého prutu k prutu zakřivenému.

Pevnost zakřiveného prutu f_{fb} lze vyjádřit vztahem uvedeným v [1]

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fd} \leq f_{fd}, \quad (2.141)$$

kde r_b je poloměr ohybu.

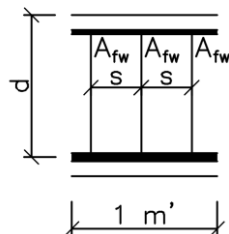
2.2.5.3.4 Minimální plocha smykové výztuže

Pokud je nutné použít smykovou výztuž, musí být dodržena její minimální plocha stanová vztahem

$$A_{fw,min} = 0,06 \sqrt{f_{ck}} \frac{b s}{0,004 E_f} \geq \frac{0,35 b s}{0,004 E_f}. \quad (2.142)$$

2.2.5.3.5 Konstrukční zásady pro příčnou výztuž

Nosníky s FRP výztuží by měly obsahovat alespoň 3 třmínky na metr délky a jejich vzájemná vzdálenost s nesmí překročit vzdálenost $0,8d$.



Obr. 2.40 Konstrukční zásady

U rámových styčníků a v místech koncentrovaných zatížení nesmí vzdálenost třmínků do vzdálenosti d překročit hodnotu:

- $d/4$,
- $12 d_b$,
- 15 cm .

2.2.5.4 Návrhový postup dle fib Bulletin No. [4]

Tento předpis neuvádí postup výpočtu smykové únosnosti prvku s FRP výztuží, obsahuje pouze přehled existujících předpisů, které se touto problematikou zabývají a teorii, ze které bylo čerpáno v kap. 2.2.1 až 2.2.4.

2.2.5.5 Protlačení lokálně podepřené stropní desky dle ACI 440.1R-06 [1]

Návrh smykové únosnosti trémového prvku dle Tureyena a Frosche (Tureyen, A. K. & Frosh, R. J., 2002 podle fib Bulletin No. 40 [4]) může být modifikovaný Carlosem Ospinou (Ospina, C.E., 2005 podle fib Bulletin No. 40 [4]) pro oboustranně vyztužené prvky. Úprava vede na vzorec (2.143), který může být použit pro výpočet únosnosti proti protlačení obousměrně vyztužených desek s FRP výztuží. Oblast použití se nevztahuje jen na oblast nad vnitřními sloupy, ale je možno vyčíslit únosnost pod soustředěným zatížením čtvercového nebo kruhového tvaru

$$V_c^* = 10\sqrt{f_c'^*} b_o^* c^*, \quad (2.143)$$

- kde V_c^* je smyková únosnost betonu v Angloamerické měrné soustavě jednotek,
- $f_c'^*$ je pevnost betonu v tlaku v Angloamerické měrné soustavě jednotek,
- b_o^* je délka kontrolního obvodu v Angloamerické měrné soustavě jednotek,
- c^* je poloha neutrální osy trhlinou porušeného průřezu v Angloamerické měrné soustavě jednotek.

Pro výpočet v jednotkách SI je vztah upraven

$$V_c = 0,8\sqrt{f'_c}b_0c, \quad (2.144)$$

kde f'_c je zaručená pevnost betonu v tlaku,

b_0 je délka kontrolního obvodu desky nebo základu ve vzdálenosti $0,5d$ od líce sloupu a má obdélníkový tvar bez ohledu na tvar sloupu,

c je poloha neutrální osy trhlinou porušeného průřezu.

Poloha neutrální osy se v případě desky spočítá

$$c = kd, \quad (2.145)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f, \quad (2.146)$$

kde k je součinitel pro výpočet výšky tlačené části průřezu,

ρ_f je stupeň vyztužení jako průměr ze stupňů vyztužení obou směrů,

n_f je pracovní součinitel.

Vztah (2.144) je možné přepsat do tvaru

$$V_c = \left(\frac{12}{5}k\right) 0,33\sqrt{f'_c}b_0d, \quad (2.147)$$

což je vztah pro železobetonové desky dle ACI 318-05 [5] upravený členem $(12/5k)$. Tento člen vyjadřuje vliv osově tuhosti FRP na celkovou únosnost proti protlačení. Vztah (2.144) resp. (2.147) byl přejat do ACI 440.1R-06 [1] zejména díky jeho podobnosti se vztahy pro výpočet smykové únosnosti prutových prvků.

2.2.6 Numerický příklad na výpočet smykové únosnosti prvku

2.2.6.1 Materiálové charakteristiky

2.2.6.1.1 Podélná výztuž

$E_f = 66 \text{ GPa}$ *modul pružnosti podélné FRP výztuže*

2.2.6.1.2 Příčná výztuž

$f_{frpv} = 630 \text{ MPa}$ *počáteční pevnost FRP výztuže v tahu*

$E_{frpv} = 44 \text{ GPa}$ *modul pružnosti příčné FRP výztuže*

2.2.6.1.3 Beton

$f_c' (f_{ck}) = 30 \text{ MPa}$ *pevnost betonu v tlaku*

2.2.6.2 Průřezové charakteristiky

$h = 0,6 \text{ m}$ *výška průřezu*

$b = 0,32 \text{ m}$ *šířka průřezu*

$A = 0,192 \text{ m}^2$ *plocha průřezu*

$c = 30 \text{ mm}$ *krytí výztuže*

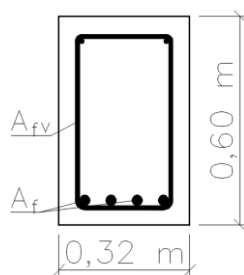
$d_{b,1} = 16 \text{ mm}$ *průměr podélné*

$d_v = 10 \text{ mm}$ *průměr třmínku*

$d = 0,552 \text{ m}$ *účinná výška průřezu*

$A_f = 7,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ *plocha podélné výztuže*

$A_{fv} = 1,42 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ *plocha jednoho třmínku (2 stříhy)*



Obr. 2.41 Průřez prvku

2.2.6.3 Statické schéma

prostě podepřený nosník o rozpětí 6 m



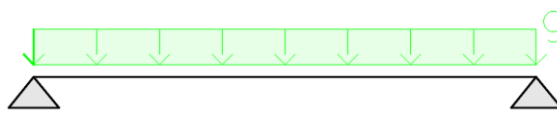
Obr. 2.42 Statické schéma

2.2.6.4 Zatížení

stálé

vlastní tíha

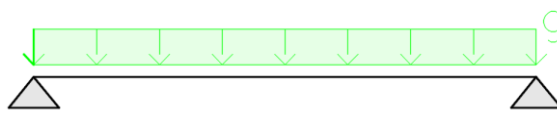
$$g = A \times \gamma = 0,192 \times 24 = 4,61 \text{ kN/m}$$



Obr. 2.43 Spojité zatížení vlastní tíhou

ostatní stálé

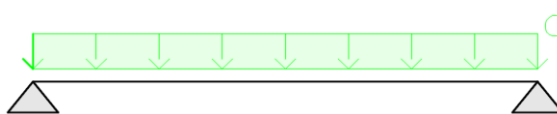
$$g = 14,0 \text{ kN/m}$$



Obr. 2.44 Spojité ostatní stálé zatížení

proměnné

$$q = 10,0 \text{ kN/m}$$



Obr. 2.45 Spojité proměnné zatížení

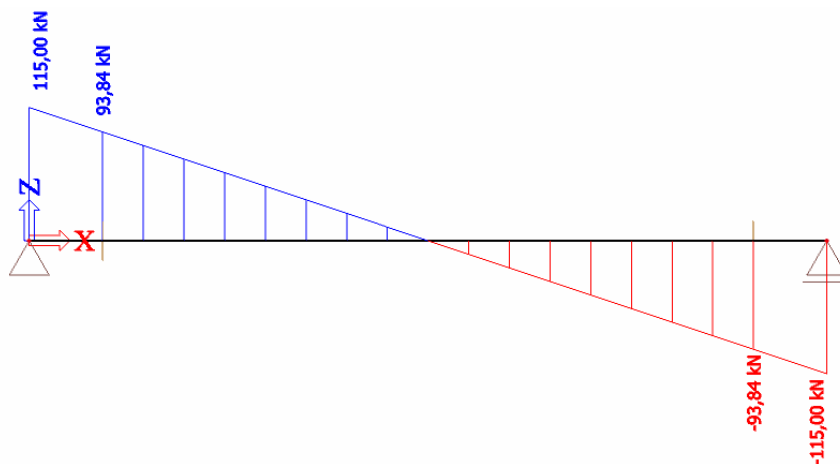
2.2.6.5 Výpočet únosnosti ve smyku dle ACI 440.1R-06 [1]

návrhová hodnota zatížení

$$w_u = 1,2w_{DL} + 1,6w_{LL} = 1,2 \times (4,61 + 14) + 1,6 \times 10 = 38,33 \text{ kN/m}$$

výpočet posouvající síly ve vzdálenosti d od podpory

$$V_u = \frac{w_u l}{2} - w_u d = \frac{38,33 \times 6}{2} - 38,332 \times 0,552 = \mathbf{93,84 \text{ kN}}$$



Obr. 2.46 Průběh posouvající síly

příspěvek betonové části průřezu ke smykové únosnosti prvku

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c = \frac{2}{5} \sqrt{30} \times 320 \times 80 = \mathbf{56,09 \text{ kN}}$$

$$c = kd = 0,142 \times 0,552 = 0,08 \text{ m}$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f = 0,142$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{66000}{4750\sqrt{f'_c}} = \frac{66000}{4750 \times \sqrt{30}} = 2,54$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} = \frac{7,92 \times 10^{-4}}{0,32 \times 0,552} = 0,00448$$

oblast bez smykové výztuže

$$V_u \leq \frac{\phi V_c}{2} = \frac{0,75 \times 56,09}{2} = \mathbf{21,04 \text{ kN}}$$

oblast s nutným návrhem smykové výztuže

$$V_u \geq \frac{\phi V_c}{2}$$

redukce napětí v ohybu třmínku

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{frpv} = \left(0,05 \frac{50}{10} + 0,3\right) 504 = 277,2 \text{ MPa}$$

$$f_{frpv} = C_E f_{fu}^* = 0,8 \times 630 = 504 \text{ MPa}$$

omezení napětí v FRP třmínku

$$f_{fv} = 0,004 E_f = 0,004 \times 44000 = 176 \text{ MPa}$$

$$\leq f_{fb} = 277,2 \text{ MPa}$$

vzdálenost třmínků

$$s = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{(V_u - \phi V_c)} = \frac{0,75 \times 142 \times 176 \times 552}{(93840 - 0,75 \times 56090)} = 208,93 \text{ mm}$$

maximální vzdálenost jednotlivých třmínků

$$s \leq \min\left\{d/2; 600 \text{ mm}\right\} = \min\left\{552/2; 600 \text{ mm}\right\} = 276 \text{ mm}$$

minimální plocha smykové výztuže

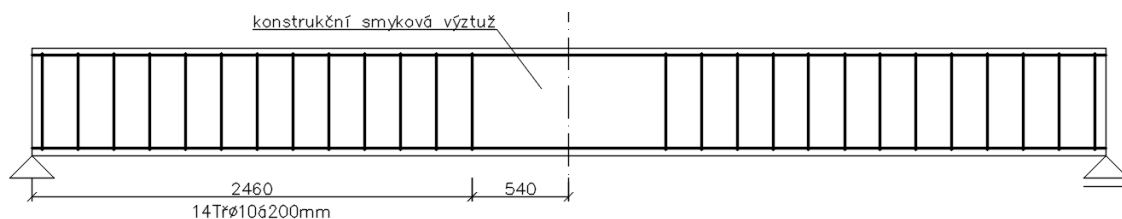
$$s \leq \frac{A_{fv} f_{fv}}{0,35 b_w} = \frac{142 \times 176}{0,35 \times 320} = 223,14 \text{ mm}$$

návrh $s = 200 \text{ mm}$

únosnost prvku se smykovou výztuží

$$V_f = \frac{\phi A_{fv} f_{fv} d}{s} = \frac{0,75 \times 142 \times 176 \times 552}{200} = 51,73 \text{ kN}$$

$$V_u = 93,84 \text{ kN} \leq V_c + V_f = 56,09 + 51,73 = 107,82 \text{ kN} \quad \text{Tř}\phi 10/200 \text{ vyhovuje}$$

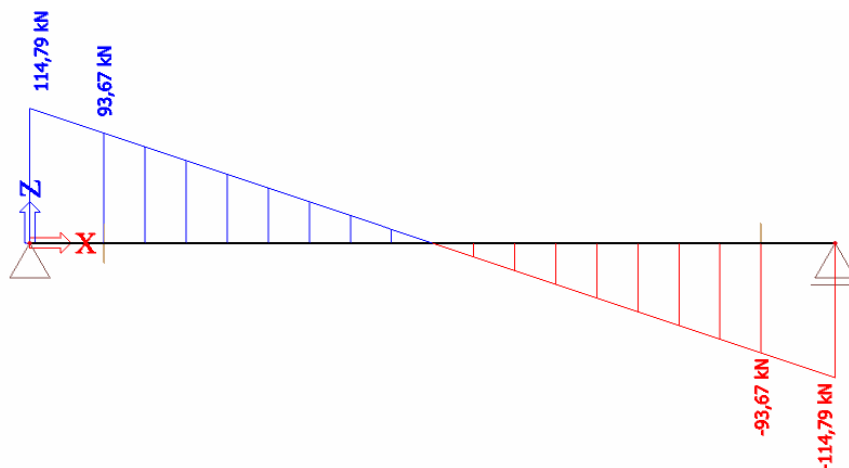


Obr. 2.47 Schéma vyztužení smykovou výztuží

2.2.6.6 Výpočet únosnosti ve smyku dle ISIS Canada [2]

návrhová hodnota zatížení

$$w_f = 1,25w_{DL} + 1,50w_{LL}$$



Obr. 2.48 Průběh posouvající síly

příspěvek betonové části průřezu ke smykové únosnosti prvku

$$V_c = 0,2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}b_wd\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}} =$$

$$= 0,2 \times 1,0 \times 0,65 \times \sqrt{30} \times 320 \times 552 \times 0,57 = 71,69 \text{ kN}$$

$$\sqrt{\frac{E_{frp}}{E_s}} = \sqrt{\frac{66}{200}} = 0,57 \leq 1,0$$

oblast bez smykové výztuže

$$V_f < \frac{V_c}{2} = \frac{71,69}{2} = 35,84 \text{ kN}$$

oblast s minimální smykovou výztuží

$$\frac{V_c}{2} \leq V_f \leq V_c + V_{frp \min}$$

- výchozí předpoklad – omezení přetvoření FRP třmínku na 2,5 ‰

$$V_{frp \min} = \varepsilon_{frpv}E_{frpv}A_{frpv} = 0,0025 \times 44000 \times 142$$

$$= 15,62 \text{ kN}$$

$$V_{\min} = V_c + V_{frp \min} = 71,69 + 15,62 = 87,31 \text{ kN}$$

maximální vzdálenost třmínků

$$s \leq \frac{0,0025 E_{frpv} A_{frpv}}{0,06 \sqrt{f'_c} b_w} = \frac{0,0025 \times 44000 \times 142}{0,06 \times \sqrt{30} \times 320}$$

$$= 150,21 \text{ mm}$$

návrh $s = 150 \text{ mm}$

oblast s nutným návrhem smykové výztuže

$$V_c + V_{frp \min} \leq V_f \leq V_{fd}$$

$$87,31 \text{ kN} \leq V_f \leq 93,67 \text{ kN}$$

nutná únosnost smykové výztuže

$$V_{frp} \geq V_f - V_c \rightarrow s \leq \frac{A_{frpv} \phi_f \sigma_v d_v \cot \theta}{V_{fd} - V_c}$$

omezení napětí v FRP třmínku

$$\sigma_v = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{(0,05 \frac{r_b}{d_s} + 0,3) f_{frpv}}{1,5} \\ \frac{(0,4 + 0,015 \frac{l_{frpd}}{d_s}) f_{frpv}}{1,5} \\ 0,0001 E_{frpv} \left(f'_c \frac{\rho_{frp} E_{frp}}{\rho_{frpv} E_{frpv}} \right)^{0,5}, \sigma_N = 0 \end{array} \right.$$

1. maximální napětí z důvodu zakřivení smykové výztuže

- poloměr ohybu $r_b \geq \max\{4d_s; 50 \text{ mm}\} = \max\{40; 50\} = 50 \text{ mm}$

$$\sigma_v = \frac{(0,05 \frac{r_b}{d_s} + 0,3) f_{frpv}}{1,5} = \frac{(0,05 \frac{50}{10} + 0,3) 630}{1,5} = 231 \text{ MPa}$$

$$s \leq \frac{A_{frpv} \phi_f \sigma_v d_v}{V_{fd} - V_c} = \frac{142 \times 0,75 \times 231 \times (0,9 \times 552)}{(93,67 - 71,69) \times 10^3} = 556,1 \text{ mm}$$

2. maximální napětí z důvodu délky háku

- délka háku $l_d^* = \max\{6d_s; 70 \text{ mm}\} = \max\{60; 70\} = 70 \text{ mm}$

$$\sigma_v = \frac{(0,4 + 0,015 \frac{l_{frpd}}{d_s}) f_{frpv}}{1,5} = \frac{(0,4 + 0,015 \frac{70}{10}) 630}{1,5} = 212,1 \text{ MPa}$$

$$s \leq \frac{A_{frpv} \phi_f \sigma_v d_v}{V_{fd} - V_c} = \frac{142 \times 0,75 \times 212,1 \times (0,9 \times 552)}{(93,67 - 71,69) \times 10^3} = 510,6 \text{ mm}$$

3. omezení přetvoření smykové výztuže

$$\sigma_v = 0,0001 E_{frpv} \left(f'_c \frac{\rho_{frp} E_{frp}}{\rho_{frpv} E_{frpv}} \right)^{0,5}$$

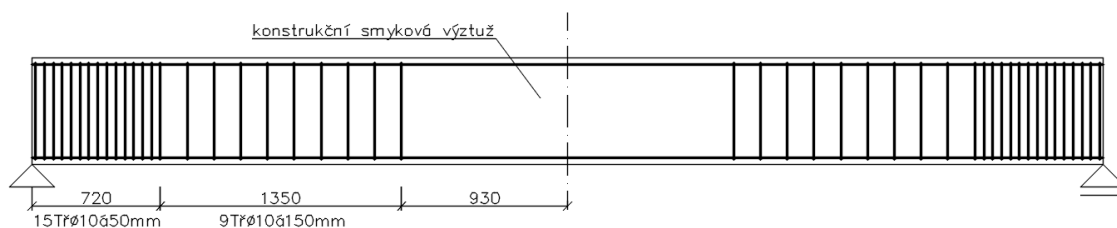
dosazením do výrazu pro výpočet maximální vzdálenosti třmínků

$$s \leq \left(\frac{0,0001 \phi_v d_v}{V_{fd} - V_c} \right)^2 f'_c \frac{A_{frp}}{b_w d} E_{frp} b_w A_{frpv} E_{frpv} =$$

$$= \left(\frac{0,0001 \times 0,75 \times (0,9 \times 552)}{(93,67 - 71,69) \times 10^3} \right)^2 30 \times \frac{792}{320 \times 552} \times 66000 \times 320 \times 142 \times 44000 =$$

$$= 51,1 \text{ mm}$$

návrh $s = 50 \text{ mm}$

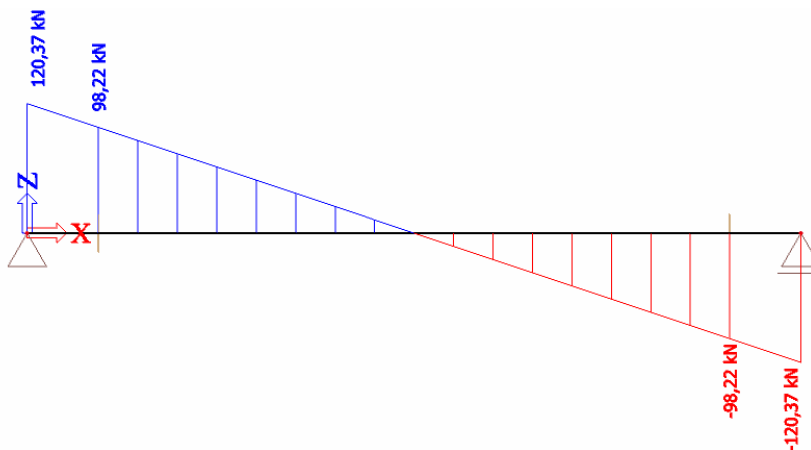


Obr. 2.49 Schéma vyztužení smykovou výztuží

2.2.6.7 Výpočet únosnosti ve smyku dle CNR-DT 203/2006 [3]

návrhová hodnota zatížení

$$w = 1,35g + 1,50q$$



Obr. 2.50 Průběh posouvající síly

oblast bez smykové výztuže

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct}; V_{Rd,max}\} = \min\{63,19; 932,66\} \\ = \mathbf{63,19 \text{ kN}}$$

příspěvek betonové části průřezu ke smykové únosnosti prvku

$$V_{Rd,ct} = 1,3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{0,5} \tau_{Rd} k (1,2 + 40 \rho_l) b d = \\ = 0,75 \times 0,33 \times 1,048 \times (1,2 + 40 \times 0,00448) \times 0,32 \times 0,552 = \\ = \mathbf{63,19 \text{ kN}}$$

$$1,3 \left(\frac{E_f}{E_s} \right)^{0,5} = 1,3 \left(\frac{66000}{20000} \right)^{0,5} = 0,75 \leq 1$$

$$\tau_{Rd} = 0,25 f_{ctd} = 0,25 \frac{2,0}{1,5} = 0,33 \text{ MPa}$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,552 = 1,048 \text{ m}$$

$$\geq 1$$

$$\rho_l = \frac{A_f}{b d} = \frac{792}{320 \times 552} = 0,00448 \leq 0,02$$

únosnost tlačeního segmentu mezi trhlinami

$$V_{Rd,max} = 0,5 b_w d v f_{cd} = 0,5 \times 0,32 \times 0,552 \times 0,53 \times \frac{30}{1,5} \\ = \mathbf{932,66 \text{ kN}}$$

$$v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \left[1 - \frac{30}{250} \right] = 0,53$$

oblast s nutným návrhem smykové výztuže

$$V_{Rd} = \min\{V_{Rd,ct} + V_{Rd,f}; V_{Rd,max}\}$$

maximální osová vzdálenost jednotlivých třmínků

$$s_{max} = 0,8d = 0,8 \times 552 = 441,2 \text{ mm}$$

$$\text{návrh } s = 200 \text{ mm}$$

únosnost smykové výztuže

$$V_{Rd,f} = \frac{A_{fw} f_{fr} d}{s} = \frac{142 \times 166,3 \times 552}{200} = 65,18 \text{ kN}$$

$$f_{fr} = \frac{f_{fd}}{\gamma_{f,\phi}} = \frac{f_{fd}}{\frac{f_{fd}}{f_{fb}}} = \frac{302,4}{166,3} = 166,3 \text{ MPa}$$

$$f_{fd} = 0,9 \eta_a \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = 0,9 \times 0,8 \times \frac{630}{1,5} = 302,4 \text{ MPa}$$

$$f_{fb} = \left(0,05 \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) f_{fd} = \left(0,05 \frac{50}{10} + 0,3\right) 302,4 = 166,3 \text{ MPa}$$

minimální plocha smykové výztuže

$$A_{fw,min} = 0,06 \sqrt{f_{ck}} \frac{b s}{0,004 E_f} \geq \frac{0,35 b s}{0,004 E_f}$$

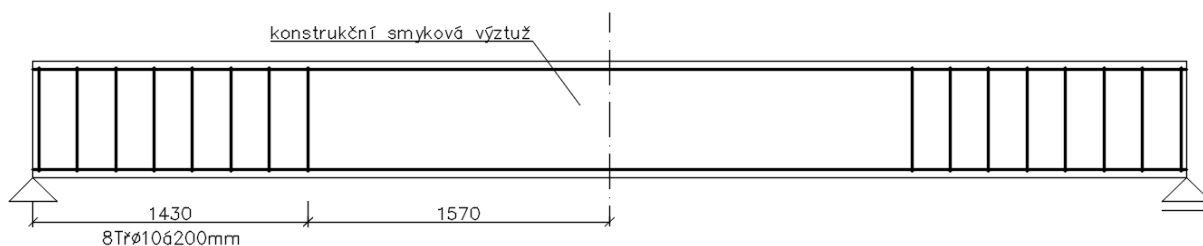
$$A_{fw,min} = 0,06 \sqrt{30} \frac{320 \times 200}{0,004 \times 44000} = 119,5 \text{ mm}^2$$

$$\geq \frac{0,35 \times 320 \times 200}{0,004 \times 44000} = \underline{127,3 \text{ mm}^2}$$

$$A_{sw} = 142 \text{ mm}^2 > A_{sw,min} = 127,3 \text{ mm}^2 \text{ vyhovuje}$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} = \frac{1,0 \times 0,32 \times 0,514 \times 0,53 \times \frac{30}{1,5} \times 10^3}{\cot 45^\circ + \tan 45^\circ} = 871,74 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min\{63,19 + 65,18; 871,74\} = 128,37 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 98,22 \text{ kN Tř} \emptyset 10/200 \text{ vyhovuje}$$



Obr. 2.51 Schéma vyztužení smykovou výztuží

2.3 Dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti

Dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti kompozitních výztuží je nutno určit s ohledem na jejich citlivost na nárůst deformací (dotvarování výztuže), únavové zatížení a působení okolního prostředí (pH prostředí, UV záření, působení chloridů apod.).

2.3.1 Faktory nejvíce ovlivňující dlouhodobé fyzikálně mechanické vlastnosti

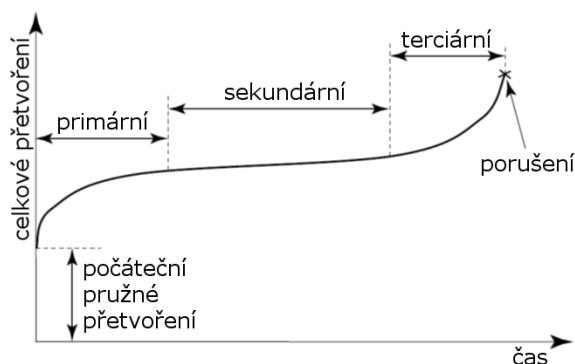
Přehled teorie v této kapitole je vypracován dle předpisu fib Bulletin No.40 [4], ve kterém je tato problematika přehledně shrnuta a v některých případech i podložena výsledky provedených zkoušek.

2.3.1.1 Dotvarování a přetržení výztuže od dotvarování (creepové porušení)

Dotvarování je pojem, který se používá k vyjádření postupného zvyšování nepružné deformace materiálu při působení dlouhodobého zatížení. To má za následek snižování pevnosti FRP výztuží. Je tedy důležité omezit napětí při působení dlouhodobého zatížení v závislosti na předpokládané životnosti konstrukce. Velikost dotvarování však nezávisí pouze na úrovni napětí ve výztuži, ale i na vlivu agresivních okolních podmínek, tj. UV záření, teplota, zásadité prostředí, střídavě suché a vlhké prostředí, zmrazovací a rozmrazovací cykly.

Pokud jsou FRP výztuže vystaveny dlouhodobému zatížení, mohou se náhle porušit za časový úsek zvaný doba trvanlivosti.

Průběh dotvarování lze rozdělit do tří fází (Obr. 2.52). Po okamžitém pružném přetvoření nastává první fáze, která je charakteristická rychlým nárůstem nevratné deformace, s přibývajícím dobou zatížení se intenzita růstu snižuje. Druhá fáze trvá po dlouhou dobu a dochází při ní ke konstantnímu nárůstu deformací, který však není tak razantní jako v první fázi. Pokud se dotvarování výztuže dostane do třetí fáze, nastane prudký nárůst deformací, který je završen přetržením výztuže.



Obr. 2.52 Průběh nepružné deformace v závislosti na čase [4]

Stanovení bezpečné hodnoty napětí, při které nedojde k dosažení třetí fáze dotvarování a tím k přetržení výztuže, je náročné především z důvodu nedostatku standardních testovacích metod a rozmanitosti složek kompozitu a výrobních procesů. V současné době je navíc nedostatek výsledků zkoušek doby trvanlivosti nad 100 hodin. To vede na konzervativní přístup k návrhu do té doby, než bude v této oblasti provedeno větší množství zkoušek. Předpokládaný vývoj únosnosti v čase se určuje lineární extrapolací z hodnot získaných z již provedených zkoušek. Tato metoda však není dostatečná pro určení dlouhodobé únosnosti, ale dává cenné poznatky o jejím vývoji.

2.3.1.2 Únava a cyklické zatěžování

Únava je definována jako degradace vlastností materiálu důsledkem opakovaného působení velkého počtu zatěžovacích cyklů. Vlastnost materiálu je obvykle vyjádřena mechanickými charakteristikami, jako je pevnost nebo tuhost. Ztráta pevnosti je přímo spojena s poruchou prvku. Moderní polymerické kompozity vykazují výbornou odolnost proti únavě. Únavové porušení FRP výztuží je komplexní jev, který může nastat porušením jednotlivých součástí kompozitu, jako je prasknutí matrice, přelomení vláken, spojování trhlin a oddělení jednotlivých složek kompozitu.

Odolnost proti únavě dále ovlivňují výkyvy teploty, zatěžovací frekvence, průměrná hodnota napětí a rozsah max/min hodnot napětí.

2.3.1.3 Účinek vysokých teplot a ohně

Působení vysoké teploty může mít negativní vliv na vlastnosti FRP výztuží. Proto se tento typ výztuží nedoporučuje použít v konstrukcích, kde je požární odolnost podstatným požadavkem pro užívání. Obetonovaná FRP výztuž nemůže vzplanout z důvodu nedostatku kyslíku, ale dochází k měknutí matrice. Teplota, při které k tomuto jevu dochází, se nazývá teplota skelného přechodu. Tato teplota je závislá na druhu použité matrice a zpravidla dosahuje hodnot okolo 110 °C. Při této teplotě je negativně ovlivněna pevnost v tahu i v soudržnosti a modul pružnosti je značně redukován vlivem změn v molekulární soustavě. Vlákná mají lepší teplotní odolnost než matrice a tudíž jsou schopny přenášet část napětí v podélném směru, avšak celkové tahové vlastnosti kompozitu jsou ovlivněny snížením přenosu sil mezi vlákny a zálivkou. Zásadnější vliv mají vysoké teploty na termoplastické matrice, které jsou složeny z lineárních makromolekul. Ty jsou drženy u sebe pouze mezimolekulárními interakcemi.

2.3.1.4 Ultrafialové záření

Ultrafialové záření nemá žádný negativní vliv na FRP výztuž pokud je chráněna betonovou vrstvou. Kompozitní výztuže by však měly být chráněny před přímým slunečním světlem během skladování. Použitím neprůhledné folie nebo jiného vhodného materiálu se zamezí degradaci FRP výztuže ještě před zabudováním do konstrukce.

2.3.1.5 Zásadité prostředí

Zatímco ocelovou výztuž betonové prostředí přirozeně chrání, v případě běžně používaných typů skleněných vláken (E-skla a S-skla) FRP výztuže může dojít k negativnímu ovlivnění jejich vlastností vlivem zásaditého prostředí betonu. Z tohoto důvodu je nutné použít skleněná vlákna v kombinaci s vhodně zvolenou matricí, která vlákna chrání. Přidáním zirkonu však vznikne AR-sklo (*Alkali-Resistant glass*), které je odolné proti působení alkalického prostředí betonu. Nejlepší odolnost proti alkalickému působení vykazují uhlíková vlákna, aramidová vlákna jsou odolná o něco méně.

Absence mezinárodně uznávané metodiky testování a použití různých druhů a kombinací vláken a zálivek má dle [4] za následek značně rozdílné výsledky zkoušek. Při některých testech byla FRP výztuž zalita betonem, zatímco jiné testy simulovaly betonové prostředí zásaditými roztoky s obsahem NaOH , KOH a nasycené $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s pH 12-13,5 a teplotním rozmezím 20-80 °C pro urychlení působení. Je nutné poznamenat, že simulované roztoky působí agresivněji než betonové prostředí z důvodu větší pohyblivosti OH^- iontů.

Z některých provedených pozorování lze dle [4] vyvodit tyto závěry:

- Výrazná degradace je zjištěna u GFRP při působení zásaditých roztoků se zvýšenou teplotou. Zabetonované pruty při působení různých teplot a s dobře zvolenou kombinací vláken a matrice ukazují na menší degradaci, která se však zvětšuje se zvyšující teplotou a napětím.
- Alkálie působí na AFRP méně nepříznivě než na GFRP, ale kombinace zásaditého roztoku a vysokých napětí mohou významně narušit vlastnosti AFRP výztuží.
- V případě dobře zvolené kombinace vláken a zálivek nedochází k narušení vlastností CFRP výztuží.
- Vinylestery mají mnohem lepší odolnost proti zásadám než polyesterové matrice.

2.3.1.6 Výkyvy teplot

Výkyvy působících teplot mohou způsobit problémy kotvení výztuže v betonu z důvodu rozdílné teplotní roztažnosti v podélném a příčném směru.

2.3.1.7 Působení vody

Molekuly vody mohou působit jako změkčovadlo matrice a narušují Van-der-Waalsovy vazby řetězců molekul. To způsobuje změny v modulu pružnosti, pevnosti a limitním přetvoření. Napětí způsobené změnou objemu při bobtnání materiálu způsobuje praskání matrice a zhoršení soudržnosti mezi vlákny a matricí.

2.3.1.8 Působení chloridů

Použití FRP výztuže by mělo být založeno na znalosti chování specifických typů FRP výztuží při působení chloridů v kombinaci s působením vlhkosti a zásad.

2.3.1.9 Karbonatace betonu

Je nepravděpodobné, aby karbonatace betonu způsobovala degradaci FRP výztuže. Naopak snižování pH betonu zvyšuje životnost a zlepšuje trvanlivost prvku vyztuženého FRP výztuží.

2.3.1.10 Působení kyselin

Dle [4] je pravděpodobné, že působení kyselin zhorší ve větší míře vlastnosti betonu než FRP výztuží.

2.3.2 Zohlednění dlouhodobých účinků při návrhu

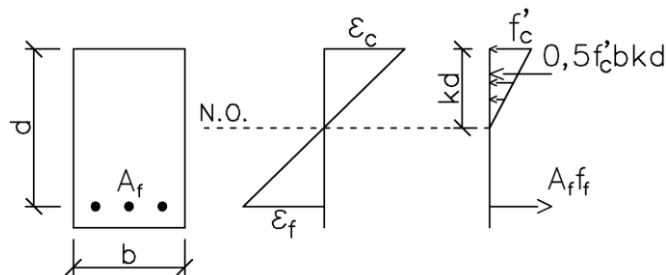
2.3.2.1 Zohlednění dlouhodobých účinků dle ACI 440.1R-06 [1]

Trvanlivost FRP výztuží je značně ovlivněna agresivitou okolního prostředí. Z tohoto důvodu byl zaveden redukční součinitel C_E pro různá prostředí a druhy vláken. Součinitelem C_E se redukuje počáteční tahová pevnost f_{fu}^* a limitní poměrné přetvoření ε_{fu}^* .

Tab. 1 Hodnoty součinitele C_E [1]

| podmínky | typ vlákna | C_E |
|-----------------------------------|------------|-------|
| beton nevystaven zemíně a vodě | uhlíkové | 1,0 |
| | skleněné | 0,8 |
| | aramidové | 0,9 |
| beton vystaven zemíně a vodě | uhlíkové | 0,9 |
| | skleněné | 0,7 |
| | aramidové | 0,8 |

Aby se předešlo náhlému přetržení FRP výztuže od dotvarování nebo cyklického zatížení a únavy, mělo by být v této výztuži omezeno napětí. Protože se napětí ve výztuži pohybuje v pružné oblasti, je možné ho určit pomocí lineární pružné analýzy, jak je naznačeno na obr. 2.53.



Obr. 2.53 Pružné rozdělení přetvoření a napětí [1]

Napětí ve výztuži od dlouhodobého zatížení $f_{f,s}$ musí být menší než maximální hodnota závislá na typu FRP výztuže:

- $0,20f_{fu}$ pro GFRP,
- $0,30f_{fu}$ pro AFRP,
- $0,55f_{fu}$ pro CFRP.

2.3.2.1.1 Dotvarování

Napětí ve výztuži je možné při namáhání ohybem vypočítat dle vztahu

$$f_{f,s} = M_s \frac{n_f d (1-k)}{I_{cr}}, \quad (2.148)$$

kde M_s je moment od všech dlouhodobých zatížení v charakteristické hodnotě (stálá zatížení a dlouhodobá složka proměnných zatížení),

n_f je pracovní součinitel určený jako poměr modulů pružnosti FRP a oceli,

I_{cr} je moment setrvačnosti trhlinou oslabeného průřezu,

k je poměr efektivní polohy neutrální osy k pružné poloze neutrální osy.

Moment setrvačnosti průřezu porušeného trhlinou se stanoví jako

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2, \quad (2.149)$$

kde b je šířka prvku,

d je účinná výška prvku,

A_f je plocha podélné FRP výztuže.

Poměr efektivní polohy neutrální osy k pružné poloze neutrální osy je možné vyjádřit pomocí stupně vyztužení ρ_f

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f. \quad (2.150)$$

2.3.2.1.2 Únava

Pokud je konstrukce vystavena únavovým režimům, měla by být omezena hodnota maximálního možného napětí. Napětí ve výztuži je možné stanovit dle vztahu (2.148), kde M_s je moment od všech stálých zatížení plus maximální moment během zatěžovacího cyklu.

2.3.2.2 Zohlednění dlouhodobých účinků dle ISIS Canada [2]

Součinitel odolnosti materiálu ϕ_f zohledňuje odlišnosti materiálových vlastností, vliv dlouhodobě působícího zatížení a typ použitých vláken. Dle CSA (CSA S806-02 podle ISIS Canada [2]) je pro všechny typy vláken roven 0,75.

Norma pro mostní konstrukce CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code, 2006 podle ISIS Canada [2]) rozlišuje typ použitých vláken rozdílnou hodnotou součinitele ϕ_f :

- $\phi_f = 0,75$ pro CFRP,
- $\phi_f = 0,60$ pro AFRP,
- $\phi_f = 0,50$ pro GFRP.

Tato příručka uvádí poznámku, že pokud je GFRP výztuž vystavena dlouhodobému zatížení, napětí ve výztuži by nemělo překročit 30 % pevnosti v tahu. S ohledem na součinitele zatížení by dlouhodobě působící napětí od daného zatížení nemělo být větší než 20-25 % pevnosti v tahu.

Dále je pro betonové mosty v CHBDC (Canadian Highway Bridge Design Code, 2006 podle ISIS Canada [2]) omezena počáteční tahová pevnost f_{frpu} součinitelem F_{SLS} ($F_{SLS} \times f_{frpu}$) v závislosti na typu FRP:

- $F_{SLS} = 0,25$ pro GFRP,
- $F_{SLS} = 0,35$ pro AFRP,
- $F_{SLS} = 0,65$ pro CFRP.

2.3.2.3 Zohlednění dlouhodobých účinků dle CNR-DT 203/2006 [3]

Degradace mechanických vlastností FRP výztuží vlivem přírodních podmínek je zohledněna součinitelem η_a . Hodnota tohoto součinitele je závislá na okolních podmínkách a typu vlákna a matrice (Tab. 2). Epoxidové matrice lze použít pouze u dočasných konstrukcí.

Tab. 2 Hodnoty součinitele η_a [3]

| podmínky | typ vlákn | matrice | η_a |
|---------------------------|-----------|-------------------|----------|
| beton nevystaven vlhkosti | uhlíkové | vinylester/epoxid | 1,0 |
| | skleněné | | 0,8 |
| | aramidové | | 0,9 |
| beton vystaven vlhkosti | uhlíkové | | 0,9 |
| | skleněné | | 0,7 |
| | aramidové | | 0,8 |

Na rozdíl od ACI 440.1R-06 [1], která omezuje maximální působící napětí ve výztuži, je vliv dlouhotrvajícího nebo cyklického zatížení na únosnost zohledněn součinitelem η_1 , který redukuje počáteční únosnost FRP výztuže.

Při výpočtu mezního stavu použitelnosti je součinitel η_1 závislý na typu vlákn. Pro mezní stav únosnosti je tento součinitel roven 1,0 při použití kteréhokoliv vlákn.

Tab. 3 Hodnoty součinitele η_1 [3]

| způsob zatěžování | typ vlákn | matrice | η_1 | |
|--|-----------|-------------------|----------|------|
| | | | MSP | MSÚ |
| kvazi-stálé a/nebo cyklické (dotvarování, relaxace, únava) | skleněné | vinylester/epoxid | 0,30 | 1,00 |
| | aramidové | | 0,50 | 1,00 |
| | uhlíkové | | 0,90 | 1,00 |

Výsledný vztah pro stanovení dlouhodobé pevnosti v tahu f_{fd} zní

$$f_{fd} = \eta_a \eta_1 \frac{f_{fk}}{\gamma_f}, \quad (2.151)$$

kde f_{fk} je charakteristická hodnota pevnosti FRP výztuže v tahu,

γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže.

2.3.2.4 Zohlednění dlouhodobých účinků dle fib Bulletin No. 40 [4]

Dlouhodobé účinky prostředí jsou zohledněny redukcí počáteční tahové pevnosti FRP výztuže součinitelem $\eta_{env,t}$, který je definován vztahem

$$\eta_{env,t} = \frac{\frac{f_{fk1000h}}{f_{fk0}}}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^n}, \quad (2.152)$$

kde $f_{fk1000h}$ je pevnost FRP výztuží v tahu v čase 1000 hodin,

f_{fk0} je krátkodobá pevnost FRP výztuží v tahu,

R_{10} je standardní redukce pevnosti za dekádu logaritmického času,

n je součinitel zahrnující tři vlivy okolí:

- n_{mo} vliv vlhkosti, tab. 4,
- n_T vliv teploty, tab. 5,
- n_{SL} redukce v závislosti na předpokládané životnosti, tab. 6.

Součinitel n je definován jako součet těchto vlivů

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL}. \quad (2.153)$$

Tab. 4 Vliv vlhkosti [4]

| n_{mo} | | |
|--------------------------------|--|--|
| suché | vlhké | vlhké nasycené |
| (rel. vlhkost $\approx 50\%$) | (beton není trvale v kontaktu s vodou, rel. vlhkost $\approx 80\%$) | (beton trvale v kontaktu s vodou, rel. vlhkost $\approx 100\%$) |
| -1 | 0 | 1 |

Tab. 5 Vliv průměrné roční teploty [4]

| n_T | | | |
|------------------------------|---|--|--|
| průměrná roční teplota (PRT) | | | |
| PRT $< 5^\circ\text{C}$ | $5^\circ\text{C} < \text{PRT} < 15^\circ\text{C}$ | $15^\circ\text{C} < \text{PRT} < 25^\circ\text{C}$ | $25^\circ\text{C} < \text{PRT} < 35^\circ\text{C}$ |
| -0,5 | 0 | 0,5 | 1 |

Tab. 6 Vliv předpokládané doby životnosti [4]

| n_{SL} | | | |
|----------------------------|--------|--------|---------|
| doba životnost | | | |
| 1 rok | 10 let | 50 let | 100 let |
| 1 | 2 | 2,7 | 3 |

V případě, že není známa pevnost FRP výztuže v tahu v čase 1000 hodin $f_{fk1000h}$, je zaveden vztah

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^{n+2}}. \quad (2.154)$$

Výsledný výpočet dlouhodobé únosnosti FRP výztuže v tahu f_{fd} je dán vztahem

$$f_{fd} = \frac{f_{fk0}}{\eta_{env,t} \gamma_f}, \quad (2.155)$$

kde γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže.

2.4 Zatížení konstrukcí

Velikost hodnot zatížení se v jednotlivých národních normách liší, stejně tak jako kombinační předpisy. Byly použity normy na zatížení dle následující tabulky.

Tab. 7 Příslušné normy zatížení pro jednotlivé předpisy

| norma | |
|-------------------------|-------------------|
| materiálová | zatížení |
| ACI 440.1R-06 [1] | ASCE/SEI 7-10 [8] |
| ISIS Canada [2] | NBCC 2010 [9] |
| CNR-DT 203/2006 [3] | EN 1990-1 [7] |
| fib. Bulletin No.40 [4] | |

2.4.1 ASCE/SEI 7-10 - Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [8]

V první řadě norma rozděluje budovy podle účelu a případného počtu přítomných lidí na čtyři rizikové kategorie. Toto rozdělení má vliv na stanovení velikosti součinitelů pro výpočet zatížení sněhem, ledem, větrem a seismicitou.

Pro návrh metodou mezních stavů je uvedeno následujících sedm základních kombinačních rovnic:

- 1) $1,4D$,
- 2) $1,2D + 1,6L + 0,5(L_r \text{ nebo } S \text{ nebo } R)$,
- 3) $1,2D + 1,6(L_r \text{ nebo } S \text{ nebo } R) + (L \text{ nebo } 0,5W)$,
- 4) $1,2D + 1,0W + L + 0,5(L_r \text{ nebo } S \text{ nebo } R)$,
- 5) $1,2D + 1,0E + L + 0,2S$,
- 6) $0,9D + 1,0W$,
- 7) $0,9D + 1,0E$,

kde D je stálé zatížení,
 E je zatížení zemětřesením,
 L je proměnné zatížení,
 L_r je proměnné zatížení na střeše,
 R je zatížení deštěm,
 S je zatížení sněhem,
 W je zatížení větrem.

2.4.2 NBCC 2010 – National Building Code of Canada [9]

Při stanovení zatížení větrem je nutné zařadit konstrukci do jedné ze tří kategorií. Základní sada kombinací se skládá z pěti rovnic. Dále se určuje, zda stálé zatížení působí příznivě či nikoliv a to rozhoduje o velikosti součinitele stálého zatížení.

- 1) $1,4D$,
- 2) $(1,25D \text{ nebo } 0,9D) + 1,5L + 0,5S + 0,4W$,
- 3) $(1,25D \text{ nebo } 0,9D) + 1,5S + 0,5L + 0,4W$,
- 4) $(1,25D \text{ nebo } 0,9D) + 1,4W + 0,5L + 0,5S$,
- 5) $1,0D + 1,0E + 0,5L + 0,25S$,

kde D je stálé zatížení,
 E je zatížení od zemětřesení,
 L je užitné zatížení,
 S je zatížení sněhem,
 T je zatížení změnou teploty, dotvarováním, smršťováním, rozdílným sedáním,
 W je zatížení větrem.

2.4.3 EN 1990-1 [7]

Pro mezní stav únosnosti je uvedena kombinace 6.10 nebo dvojice kombinací 6.10a a 6.10b.

2.4.3.1 Kombinace 6.10

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}.$$

2.4.3.2 Dvojice kombinací 6.10a a 6.10b

Kombinace 6.10a

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i},$$

Kombinace 6.10b

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i},$$

kde “+“ značí „kombinovaný s“,

Σ značí „kombinovaný účinek“,

ξ je redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení G,

P značí zatížení předpětím,

$Q_{k,1}$ značí charakteristickou hodnotu hlavního proměnného zatížení,

ψ je kombinační součinitel,

γ_f je součinitel zatížení.

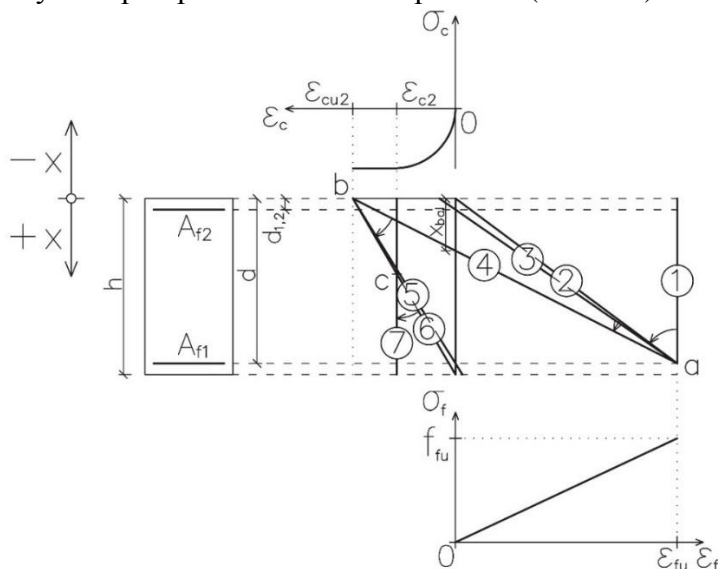
Tab. 8 Hodnoty součinitele γ [7]

| Trvalé a dočasné návrhové situace | Stálá zatížení | | Hlavní proměnné zatížení | Vedlejší proměnná zatížení | |
|-----------------------------------|---------------------------|----------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | nepříznivá | příznivá | | Nejúčinnější (pokud se vyskytuje) | Ostatní |
| Rce. 6.10 | 1,35 | 1,00 | 1,5 (příznivé 0) | | 1,5 (nepříznivé 0) |
| Rce. 6.10a | 1,35 | 1,00 | | 1,5 (nepříznivé 0) | 1,5 (nepříznivé 0) |
| Rce. 6.10b | $0,85 \times 1,35 = 1,15$ | 1,00 | 1,5 (příznivé 0) | | 1,5 (nepříznivé 0) |

Kapitola 3

Konstrukce interakčního diagramu

Se změnou polohy síly působící na prvek dochází i ke změně polohy neutrální osy. S ohledem na vlastnosti FRP výztuží (zejména pružné chování až do porušení a zanedbatelná únosnost v tlaku) lze stanovit dle obr. 3.1 sedm významných poloh neutrální osy a příslušných průběhů přetvoření průřezu. Tyto průběhy jsou popsány v kapitole 3.1. Analýza významných průběhů přetvoření je provedena na obdélníkovém průřezu s vrstvami FRP výztuží při spodním i vrchním povrchu (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 Oblasti přetvoření průřezu v mezním stavu

Jelikož se symboly použité na obr. 3.1 shodují se symbolikou dle CNR-DT 203/2006 [3] a fib Bulletin No. 40 [4], bude analýza jednotlivých významných průběhů přetvoření průřezu doplněna o způsob výpočtu síly v tlačené části průřezu F_c a síly v tažené FRP výztuži F_f pro určení souřadnic normálové a momentové únosnosti $[N_{Rd}; M_{Rd}]$ tvořících interakční diagram v těchto oblastech. Předpisy ACI 440.1R-06 [1] a ISIS Canada [2] se liší zejména použitými symboly, součiniteli bezpečnosti a pracovními diagramy pro určení napětí v tlačené části průřezu, budou tedy v dalších kapitolách řešeny samostatně.

3.1 Analýza významných průběhů přetvoření průřezu

3.1.1 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 1

Při přetvoření průřezu, kdy se poloha neutrální osy x blíží nekonečnu ($x \gg -\infty$), jsou obě vrstvy výztuže plně využity

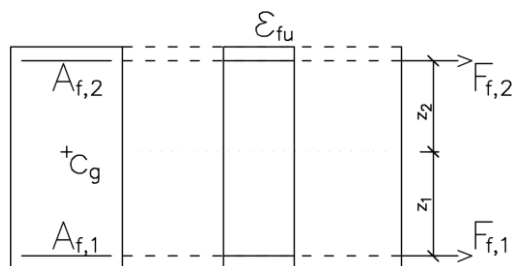
$$F_{f,1} = A_{f,1} \varepsilon_{fu} E_f, \quad (3.1)$$

$$F_{f,2} = A_{f,2} \varepsilon_{fu} E_f, \quad (3.2)$$

- kde $F_{f,i}$ je síla v i-té vrstvě výztuže,
 $A_{f,i}$ je plocha i-té vrstvy výztuže,
 ε_{fu} je mezní poměrné přetvoření FRP výztuže,
 E_f je modul pružnosti FRP výztuže.

Při tomto způsobu porušení nevzniká tlačená oblast a síla v tlačené části průřezu F_c je nulová

$$F_c = 0. \quad (3.3)$$



Obr. 3.2 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 1

Při přibližování neutrální osy až k okraji průřezu ($x \in (-\infty; 0)$) se rovina přetvoření otáčí kolem bodu a . Přetvoření horní vrstvy výztuže $\varepsilon_{f,2}$ a tím i napětí $f_{f,2}$ se tak snižuje

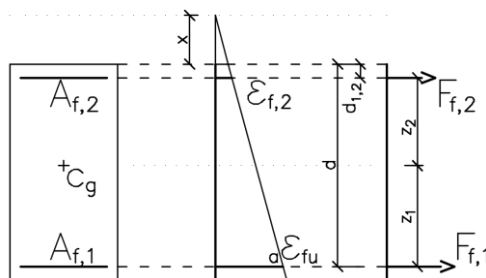
$$\varepsilon_{f,2} = \frac{d_{1,2} - |x|}{d - |x|} \varepsilon_{fu}, \quad (3.4)$$

kde d je účinná výška průřezu,

$d_{1,2}$ je vzdálenost těžiště horní vrstvy výztuže od tlačného okraje průřezu.

Síla ve vrstvě výztuže, která nedosahuje mezního přetvoření, se určí dle vztahu

$$f_{f,2} = \varepsilon_{f,2} E_f. \quad (3.5)$$



Obr. 3.3 Přetvoření průřezu odpovídající oblasti 1-2

3.1.2 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 2

Neutrální osa je totožná s horním okrajem průřezu ($x=0$). Stále tedy v průřezu nevzniká tlačená oblast

$$F_c = 0. \quad (3.6)$$

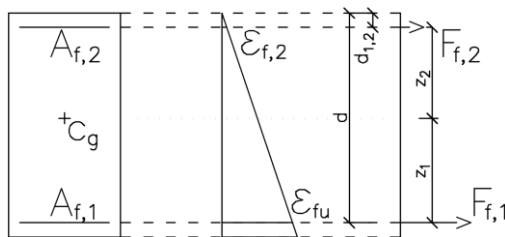
Přetvoření horní vrstvy výztuže $\varepsilon_{f,2}$ lze určit na základě předpokladu o rovinnosti průřezu po přetvoření vztahem

$$\varepsilon_{f,2} = \frac{d_{1,2}}{d} \varepsilon_{fu}. \quad (3.7)$$

Síly v jednotlivých vrstvách výztuže jsou dány vztahy

$$F_{f,1} = A_{f,1} \varepsilon_{fu} E_f, \quad (3.8)$$

$$F_{f,2} = A_{f,2} \varepsilon_{f,2} E_f. \quad (3.9)$$



Obr. 3.4 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 2

S dalším přibližováním působivé síly k těžišti průřezu ($x>0$) již začíná působit beton v tlaku. Jelikož v této oblasti nedosahuje beton svého limitního přetvoření, nelze použít zjednodušený obdélníkový průběh napětí v závislosti na přetvoření a je nutné použít jiný pracovní diagram pro dimenzování. Použit je parabolicko-rektangulární pracovní diagram dle EC [8] (Obr. 3.5) popsán funkcemi

$$f_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}, \quad (3.10)$$

$$f_c = f_{cd} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}, \quad (3.11)$$

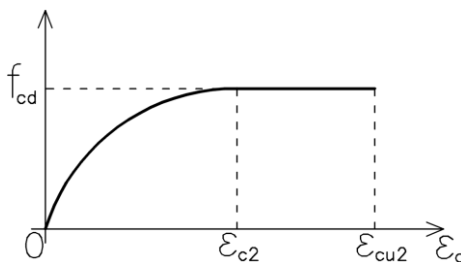
kde f_c je napětí v betonu při přetvoření krajních vláken ε_c ,

f_{cd} je návrhová pevnost betonu v tlaku,

n je součinitel roven 2 pro beton do pevnostní třídy C50/60,

ε_{c2} je přetvoření při dosažení pevnosti betonu v tlaku,

ε_{cu2} je limitní přetvoření betonu v tlaku.



Obr. 3.5 Parabolicko-rektangulární pracovní diagram [8]

Sílu v tlačené části průřezu F_c lze vyjádřit vztahem

$$F_c = \alpha f_{cd} x b, \quad (3.12)$$

kde b je šířka průřezu,

α je součinitel převádějící rozdělení napětí v tlačené části průřezu na rovnoměrné.

Součinitel α je určen jednobodovou integrací plochy pod pracovním diagramem v závislosti na dosaženém přetvoření betonu. Plochu omezenou pracovním diagramem lze určit

$$\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c = \alpha f_{cd} \varepsilon_c. \quad (3.13)$$

Vyjádřením α

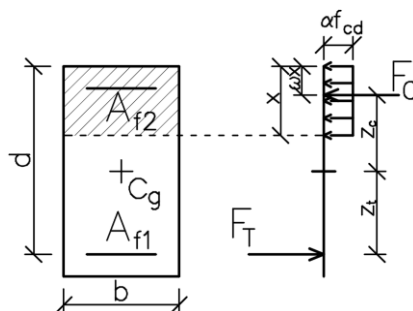
$$\alpha = \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c}{f_{cd} \varepsilon_c}. \quad (3.14)$$

Dosazením (3.14) do vztahů (3.10) a (3.11) pro beton pevnostní třídy do C50/60

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_c^2} \text{ pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}, \quad (3.15)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \text{ pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}. \quad (3.16)$$

Síla v tlačené části průřezu působí v těžišti tlačené oblasti, které je definováno jako vzdálenost ωx od extrémně tlačných vláken.



Obr. 3.6 Význam součinitelů α a ω při výpočtu únosnosti průřezu

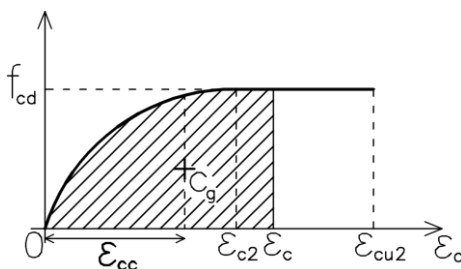
Velikost součinitele ω lze odvodit pomocí vztahu pro moment setrvačnosti

$$S = A \varepsilon_{cc}, \quad (3.17)$$

kde S je moment setrvačnosti,

A je plocha pod pracovním diagramem,

ε_{cc} je přetvoření betonu v úrovni těžiště tlačené části průřezu.



Obr. 3.7 Přetvoření betonu v úrovni těžiště

Přetvoření betonu v úrovni těžiště

$$\varepsilon_{cc} = (1 - \omega) \varepsilon_c. \quad (3.18)$$

Dosazením (3.14) a (3.18) do (3.17) se vztah upraví na

$$S = \left(\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c \right) (1 - \omega) \varepsilon_c. \quad (3.19)$$

Moment setrvačnosti je také možné vyjádřit vztahem

$$S = \int_0^{\varepsilon_c} f_c \varepsilon_c d\varepsilon_c. \quad (3.20)$$

Položením rovnosti mezi (3.19) a (3.20) lze vyjádřit vztah pro ω

$$\omega = 1 - \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c \varepsilon_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_c \int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c}. \quad (3.21)$$

Dosažením (3.21) do (3.10) a (3.11) jsou vyjádřeny vztahy pro určení těžiště působící síly v tlačené části průřezu

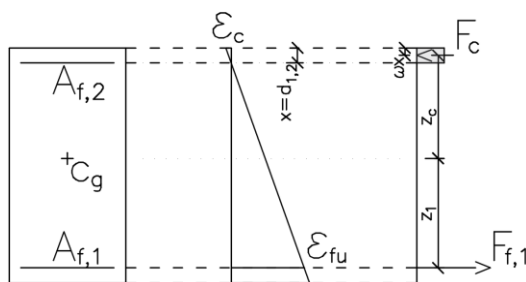
$$\omega = \frac{4\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}, \quad (3.22)$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_{c2})} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}. \quad (3.23)$$

3.1.3 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 3

Při této poloze neutrální osy ($x = d_{l,2}$) je dosaženo nulového přetvoření horní výztuže. Další přibližování neutrální osy k těžišti průřezu vede k vnesení tlakového napětí do této vrstvy výztuže. Tlaková únosnost FRP výztuží je dle doporučení všech předpisů, ze kterých se čerpá ([1] až [4]) zanedbána. Platí tedy

$$F_{f,i} = 0 \quad \text{pro } \varepsilon_{f,i} \leq 0. \quad (3.24)$$



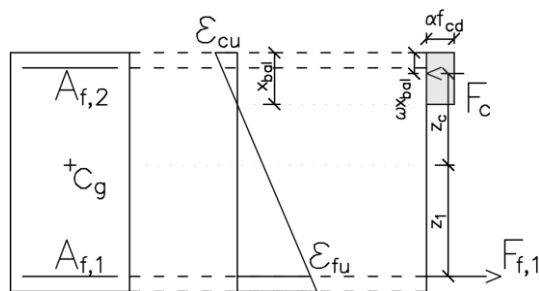
Obr. 3.8 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 3

3.1.4 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 4

Poloha neutrální osy, kdy dochází k současnému porušení přetržením FRP výztuže a drcením betonu se nazývá balanční ($x = x_{bal}$). Tato poloha se dá označit jako rozhraní mezi tahovým a tlakovým porušením průřezu. Přetvoření spodní tažené FRP výztuže stále dosahuje své mezní hodnoty ε_{fu} a tedy je možné sílu v této výztuži určit dle vztahu (3.1). Přetvoření krajních tlačných vláken průřezu ε_c je taktéž rovno své limitní hodnotě ε_{cu} , tudíž je již možné nahradit průběh napětí rovnoměrným rozdělením napětí nebo nadále používat parabolicko-rektangulární pracovní digram s dosazením $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$ do vztahů (3.16) a (3.23)

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}, \quad (3.25)$$

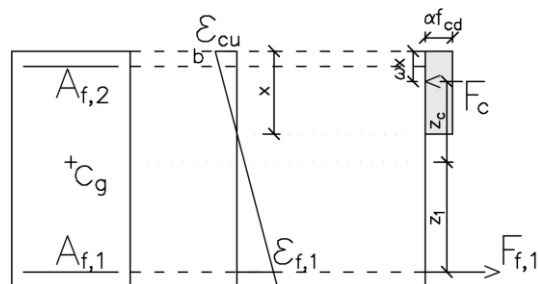
$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}. \quad (3.26)$$



Obr. 3.9 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 4

Při dalším zvyšování výšky tlačené části průřezu ($x \in (x_{bal}; d)$) dochází ke snižování přetvoření v úrovni spodní tažené výztuže (pootáčení kolem bodu b). Na základě předpokladu o rovinnosti průřezu po deformaci a dokonalé soudržnosti mezi betonem a výztuží je možné přetvoření výztuže $\varepsilon_{f,1}$ určit dle vztahu

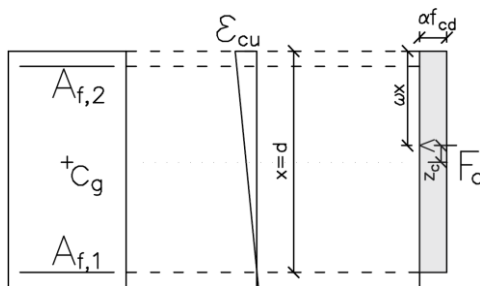
$$\varepsilon_{f,1} = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} (d - x). \quad (3.27)$$



Obr. 3.10 Přetvoření průřezu odpovídající oblasti 4-5

3.1.5 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 5

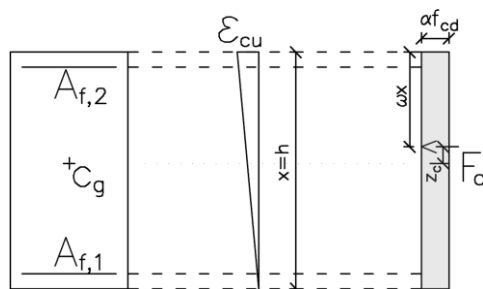
Výška tlačené části průřezu je rovna účinné výšce ($x = d$). Přetvoření spodní výztuže je tedy rovno nule a dle vztahu (3.24) nepřispívá žádná vrstva výztuže k únosnosti průřezu a celková únosnost je dána pouze příspěvkem tlačené části průřezu F_c .



Obr. 3.11 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 5

3.1.6 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 6

Při výšce tlačené oblasti $x = h$ je celý průřez tlačén. Dalším přibližováním působí síly k těžišti průřezu dojde k pootáčení úsečky znázorňující přetvoření průřezu kolem bodu c až do případu dostředného tlaku.

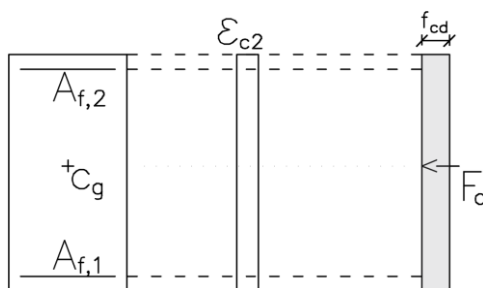


Obr. 3.12 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 6

3.1.7 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 7

Působící síla se nachází přímo v těžišti průřezu a celý průřez je tak tlačén. Síla v tlačéné části průřezu je pro případ dostředného tlaku v EC [6] definována vztahem

$$F_c = f_{cd} b h. \quad (3.28)$$



Obr. 3.13 Přetvoření průřezu odpovídající poloze 7

3.2 Výpočet bodů interakčního diagramu dle CNR-DT 203/2006 [3] a fib Bulletin No. 40 – FRP Reinforcement in RC Structures [4]

Určování jednotlivých bodů interakčního diagramu je možné postupnou změnou polohy neutrální osy za dodržení podmínek pro výpočet sil v kapitole 3.1 dle vztahů

$$N_{Rd} = F_c + F_f, \quad (3.29)$$

$$M_{Rd} = F_c z_c + F_f z_t, \quad (3.30)$$

kde z_c je rameno síly tlačéné části průřezu dle vztahu

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x, \quad (3.31)$$

z_t je rameno síly tažené FRP výztuže dle vztahu

$$z_t = d - \frac{h}{2}. \quad (3.32)$$

3.2.1 Omezení únosnosti tlačného prvku dle EC2 [6]

Do únosnosti je zahrnut vliv nehomogenity betonu v průřezu v podobě minimální výstřednosti

$$e_0 = \max\left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm}\right). \quad (3.33)$$

Omezení vznikne protnutím polopřímky vedené z počátku pod úhlem $\arctg(e_0)$ s interakčním diagramem.

3.3 Výpočet bodů interakčního diagramu dle ACI 440.1R-06 [1]

Při určování únosnosti průřezu v oblasti přetržení výztuže není možné použít zjednodušené obdélníkové rozložení napětí v tlačné části průřezu, protože beton nedosahuje limitního přetvoření. Přesněji lze rozložení napětí v závislosti na dosaženém přetvoření popsat funkcí paraboly dle Hognestada (3.34 až 3.36) až do přetvoření betonu při maximálním působícím napětí ε_0 a následným konstantním průběhem (obr. 3.14)

$$f_c = f'_c \left[2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \text{ pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0, \quad (3.34)$$

$$f_c = f'_c \text{ pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003, \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c}, \quad (3.36)$$

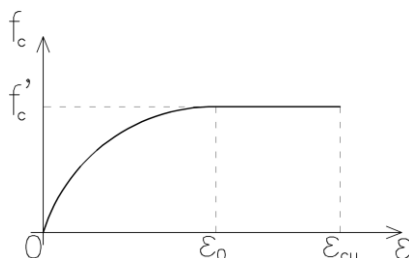
kde f_c je napětí v betonu,

f'_c je maximální napětí v betonu,

ε_c je přetvoření betonu krajních vláken,

ε_0 je přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu,

E_c je modul pružnosti betonu.



Obr. 3.14 Pracovní diagram betonu

Sílu v tlačné části průřezu C lze vyjádřit vztahem

$$C = \alpha f'_c b c, \quad (3.37)$$

kde α je součinitel převádějící rozdělení napětí na rovnoměrné,

b je šířka průřezu,

c je výška tlačené části průřezu.

Součinitel α je odvozen stejným způsobem jako v kapitole 3.1.2

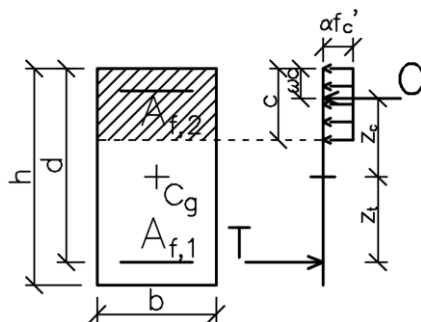
$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0, \quad (3.38)$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003. \quad (3.39)$$

Síla v tlačené části průřezu působí v těžišti tlačené oblasti, která je definována jako vzdálenost ωc od extrémně tlačných vláken.

$$\omega = \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_0 - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0, \quad (3.40)$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_0^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003. \quad (3.41)$$



Obr. 3.15 Síly působící na průřez

Rameno síly tlačené části průřezu z_c je dle obr. 3.15 určeno vztahem

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega c. \quad (3.42)$$

Rameno síly tažené FRP výztuže z_t je určeno vztahem

$$z_t = d - \frac{h}{2}. \quad (3.43)$$

Sílu v tažené FRP výztuži T lze vyjádřit vztahem

$$T = A_f f_{fu}. \quad (3.44)$$

V oblasti tlakového porušení lze sílu v tlačené části průřezu vypočítat dle vztahu (2.10) kapitoly 2.1.1.2.3

$$C = 0,85 f'_c ab. \quad (2.10)$$

Sílu v tažené FRP výztuži je možné určit dle vztahu (2.22)

$$T = A_f f_f, \quad (2.22)$$

kde f_f je napětí v FRP výztuži určené dle vztahu (2.20)

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a}. \quad (2.20)$$

Únosnost průřezu v jednotlivých bodech interakčního diagramu lze určit dle vztahů

$$\phi N_n = \phi (C + T), \quad (3.45)$$

$$\phi M_n = \phi (C z_c + T z_t), \quad (3.46)$$

kde ϕ je redukční faktor ohybové únosnosti, viz kap. 2.1.1.2.5.

3.3.1 Omezení únosnosti tlačného prvku dle ACI 318-05 [5]

Dalším krokem je stanovení únosnosti při dostředném tlaku. Norma ACI 318-05 [5] uvádí následující postup pro železobeton

$$\phi P_0 = 0,85 \phi [f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}], \quad (3.47)$$

kde P_0 je normálová únosnost průřezu při nulové excentricitě,

A_g je celková plocha průřezu,

A_{st} je plocha ocelové výztuže,

f_y je mez kluzu ocelové výztuže.

Odtud lze odvodit vzorec pro výpočet u prvku s FRP výztuží. Příspěvek tlakové únosnosti FRP výztuže je zanedbán

$$\phi P_0 = 0,85 \phi f'_c A_g. \quad (3.48)$$

Při výpočtu maximálního dovoleného tlakového namáhání při teoreticky nulové excentricitě je nutné zohlednit typ příčné výztuže. Únosnost průřezu je omezena hodnotou $\phi P_n(max)$

pro sloupy s třmínky

$$\phi P_n(max) = \phi 0,80 P_0, \quad (3.49)$$

pro sloupy se spirálovou příčnou výztuží

$$\phi P_n(max) = \phi 0,85 P_0. \quad (3.50)$$

3.4 Výpočet bodů interakčního diagramu dle ISIS Canada - Reinforcing Concrete Structures with FRP, 2007 [2]

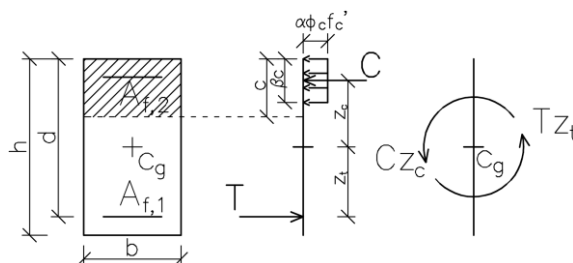
V případě tahového porušení se součinitele upravující rozměry náhradního rozdělení napětí α a β vází na hodnotu dosaženého přetvoření betonu ε_c a je tedy nutné je pro každou polohu neutrální osy určit z tab. B.1 až B.3 v ISIS Canada [2] nebo pomocí (Obr. 2.15) a (Obr. 2.16).

Síla v tlačené části průřezu je dána vztahem (2.57) v kap. 2.1.2.3.3

$$C = \alpha \phi_c f'_c \beta c b. \quad (2.57)$$

Rameno síly tlačené části průřezu z_c je dle obr. 3.16 určeno vztahem

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta c}{2}. \quad (3.51)$$



Obr.3.16 Síly působící na průřez

Výslednice tahových sil FRP výztuže je určena dle kap. 2.1.2.3.3

$$T = A_{frp} \phi_f \varepsilon_{frpu} E_{frp}. \quad (2.58)$$

Rameno síly tažené FRP výztuže z_t je určeno vztahem

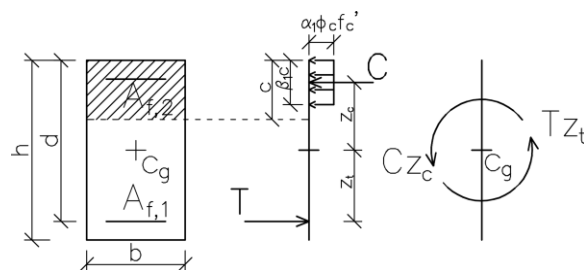
$$z_t = d - \frac{h}{2}. \quad (3.52)$$

Pokud nastává případ porušení drcením betonu, je dle kap. 2.1.2.3.2 určena síla v tlačené části průřezu C vztahem

$$C = \alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c b. \quad (2.45)$$

Rameno síly tlačené části průřezu z_c je dle obr. 3.17 určeno vztahem

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2}. \quad (3.53)$$



Obr.3.17 Síly působící na průřez

Tahovou sílu v FRP výztuži T lze vyjádřit vztahem

$$T = A_{frp} \phi_{frp} f_{frp}, \quad (2.46)$$

Únosnost průřezu v jednotlivých bodech interakčního diagramu lze určit dle vztahů

$$N_r = C + T, \quad (3.54)$$

$$M_r = Cz_c + Tz_t. \quad (3.55)$$

3.4.1 Omezení únosnosti tláčeného prvku dle CSA A23.3-04 [10]

Určení únosnosti při dostředném tlaku P_0 pro prvek s FRP výztuží lze odvodit z postupu dle CSA A23.3-04 [10] pro železobeton

$$P_0 = \alpha_1 \phi_c f'_c A_g. \quad (3.56)$$

Maximální dovolené tlakové namáhání při teoreticky nulové excentricitě je omezeno hodnotou $P_{r,max}$

$$P_{r,max} = 0,80P_0. \quad (3.57)$$

3.5 Interakční diagram průřezu pro namáhání N + M

Nejprve je vytvořen interakční diagram krátkodobé únosnosti pro zvolený typ výztuže a geometrie průřezu dle postupu v kap. 3.1 až 3.4. Z důvodu citlivosti FRP výztuží na porušení od dlouhodobě působícího zatížení je vytvořen interakční diagram pro zamezení creepového porušení. Tento interakční diagram je ovlivněn snížením pevnosti FRP výztuže dle jednotlivých předpisů a materiálové vlastnosti jsou uvažovány v charakteristických hodnotách. V charakteristických hodnotách je uvažováno i zatížení.

Pro potřebu konstrukce interakčního diagramu byla zvolena nekovová výztuž se skleněnými vlákny GFRP s počáteční pevností v tahu 630 MPa, limitním přetvořením 15,75‰ a modulem pružnosti 40 GPa. Beton o pevnosti v tlaku (charakteristické) 30 MPa.

3.5.1 Materiálové charakteristiky

FRP výztuž

$f_{fu}^* (f_{fu}) = 630 \text{ MPa}$ počáteční pevnost FRP výztuže v tahu

$\varepsilon_{fu}^* (\varepsilon_{fu}) = 15,75 \text{ ‰}$ mezní přetvoření FRP výztuže

$E_f = 40 \text{ GPa}$ modul pružnosti FRP výztuže

Beton

$f_c' (f_{ck}) = 30 \text{ MPa}$ pevnost betonu v tlaku

3.5.2 Průřezové charakteristiky

$h = 0,6 \text{ m}$ výška průřezu

$b = 0,32 \text{ m}$ šířka průřezu

$A = 0,192 \text{ m}^2$ plocha průřezu

$c = 30 \text{ mm}$ krytí výztuže

$d_{b,1} = 16 \text{ mm}$ průměr spodní výztuže

$d_{b,2} = 6 \text{ mm}$ průměr horní výztuže

$d_{\text{shear}} = 10 \text{ mm}$ průměr třmínku

$d = 0,552 \text{ m}$ účinná výška pro spodní výztuž

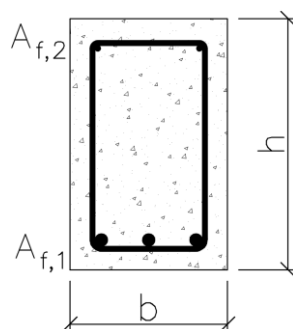
$d_h = 0,557 \text{ m}$ účinný výška pro horní výztuž

$z_1 = 0,252 \text{ m}$ rameno vnitřních sil vzhledem k těžišti průřezu pro spodní výztuž

$z_2 = 0,257 \text{ m}$ rameno vnitřních sil vzhledem k těžišti průřezu pro horní výztuž

$A_{f,1} = 7,92 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ plocha spodní výztuže

$A_{f,2} = 0,62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ plocha horní výztuže



Obr. 3.18 Průřez prvku

3.5.3 Interakční diagram dle ACI 440.1R-06 [1]

3.5.3.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže

1. návrhová únosnost FRP výztuže

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 0,8 \times 630 = \mathbf{504 \text{ MPa}}$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0,8 \times 0,01575 = \mathbf{0,0126}$$

$$C_E = \mathbf{0,8} \quad \text{součinitel spolehlivosti pro GRRP výztuž}$$

2. redukční faktor

$$\rho_f \leq \rho_{fb}$$

$$\rho_f = 0,0045 \leq \rho_{fb} = 0,0083 \rightarrow \phi = \mathbf{0,55}$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b d} = \frac{7,92 \times 10^{-4}}{0,32 \times 0,552} = \mathbf{0,0045}$$

$$\rho_{fb} = 0,85 \frac{f'_c}{f_{fu}} \beta_1 \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} = 0,85 \times \frac{30}{504} \times 0,85 \times \frac{40 \times 10^3 \times 0,003}{40 \times 10^3 \times 0,003 + 504} =$$

$$= \mathbf{0,0083}$$

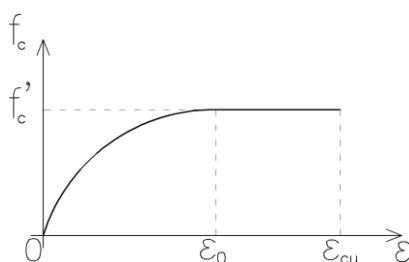
$$\beta_1 = 0,85$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,003$$

3. oblast tahového porušení

- výpočet je pro různé polohy neutrální osy c proveden v tab. 3.1

$$C = -\alpha f'_c c b$$



Obr. 3.19 Pracovní diagram betonu

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_0} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003$$

$$\varepsilon_c = \frac{c}{d-c} \varepsilon_{fu}$$

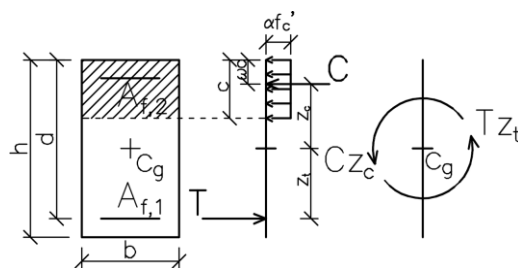
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega c$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_0 - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_0^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003$$

$$T = A_f f_{fu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.20 Oblast tahového porušení

4. oblast tlakového porušení

- výpočet je pro různé polohy neutrální osy c proveden v tab. 3.1

$$C = -0,85 f'_c a b$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{a}{2}$$

$$a = \beta_1 c$$

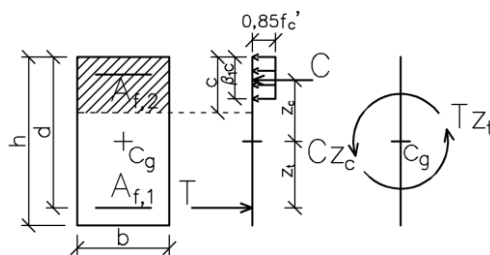
$$T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-c}{c} \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,003$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.21 Oblast tlakového porušení

5. výpočet únosnosti průřezu

$$\phi M_n = \phi (C z_c + T z_t)$$

$$\phi N_n = \phi (C + T)$$

6. dostředný tah

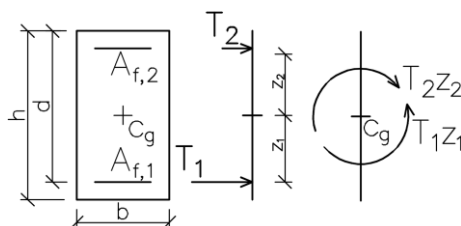
$$C = 0 \text{ kN}$$

$$T_1 = A_{f,1}f_{fu} = 7,92 \times 10^{-4} \times 504 \times 10^3 = \mathbf{399,17 \text{ kN}}$$

$$T_2 = A_{f,2}f_{fu} = 0,62 \times 10^{-4} \times 504 \times 10^3 = \mathbf{31,25 \text{ kN}}$$

$$\phi M_n = \phi(T_1 z_1 - T_2 z_2) = 0,55(399,17 \times 0,252 + 31,25 \times 0,257) = \mathbf{50,91 \text{ kNm}}$$

$$\phi N_n = \phi \sum T = 0,55(399,17 + 31,25) = \mathbf{236,73 \text{ kN}}$$



Obr. 3.22 Dostředný tah

7. dostředný tlak

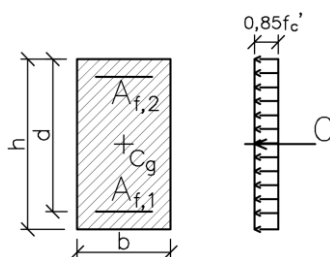
$$C = -bh0,85f'_c = -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 0,85 \times 10^3 = \mathbf{-4896 \text{ kN}}$$

$$T_1 = A_{f,1}f_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0 = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$T_2 = A_{f,2}f_f = 0,62 \times 10^{-4} \times 0 = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$\phi M_n = \mathbf{0 \text{ kNm}}$$

$$\phi N_n = \phi C = 0,55 \times 4896 = \mathbf{2692,80 \text{ kN}}$$



Obr. 3.23 Dostředný tlak

8. omezení únosnosti tlačného prvku dle ACI 318-05 [6]

$$\phi P_n(max) = \phi 0,80P_0 = -0,55 \times 0,80 \times 4896 = \mathbf{-2154,24 \text{ kN}}$$

Tab. 3.1 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle ACI 440.1R-06 [1]

| | c [m] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | ϕM_n [kNm] | ϕN_n [kN] |
|---------|----------------|------------------|------------------|--------------|---------|-----------|-------------|--------|-----------|------------------|-----------------|
| tahové | dostředný tah | | | | | | | | | 50,91 | 236,73 |
| | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 55,32 | 219,54 |
| | 0,009 | 0,0002 | 0,0991 | 0,3363 | 7,15 | 0,297 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 56,49 | 215,61 |
| | 0,018 | 0,0004 | 0,1941 | 0,3396 | 28,02 | 0,294 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 59,86 | 204,13 |
| | 0,027 | 0,0006 | 0,2844 | 0,3432 | 61,60 | 0,291 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 65,18 | 185,66 |
| | 0,035 | 0,0009 | 0,3694 | 0,3473 | 106,67 | 0,288 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 72,20 | 160,87 |
| | 0,044 | 0,0011 | 0,4484 | 0,3520 | 161,84 | 0,284 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 80,64 | 130,53 |
| | 0,053 | 0,0013 | 0,5205 | 0,3573 | 225,43 | 0,281 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 90,17 | 95,56 |
| | 0,062 | 0,0016 | 0,5848 | 0,3634 | 295,50 | 0,277 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 100,42 | 57,02 |
| | 0,071 | 0,0019 | 0,6404 | 0,3706 | 369,79 | 0,274 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 111,01 | 16,16 |
| | 0,080 | 0,0021 | 0,6861 | 0,3789 | 445,71 | 0,270 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 121,47 | -25,60 |
| | 0,088 | 0,0024 | 0,7228 | 0,3880 | 521,72 | 0,266 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 131,56 | -67,40 |
| | 0,097 | 0,0027 | 0,7528 | 0,3967 | 597,72 | 0,261 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 141,26 | -109,20 |
| | 0,1062 | 0,0902 | 0,0126 | | 736,28 | 0,255 | 504,00 | 399,17 | 0,252 | 158,54 | -185,41 |
| c_b | 0,147 | 0,1247 | 0,0083 | | 1017,41 | 0,238 | 331,58 | 262,61 | 0,252 | 169,39 | -415,14 |
| tlakové | 0,187 | 0,1591 | 0,0058 | | 1298,54 | 0,220 | 233,81 | 185,18 | 0,252 | 183,10 | -612,35 |
| | 0,228 | 0,1936 | 0,0043 | | 1579,66 | 0,203 | 170,85 | 135,31 | 0,252 | 195,30 | -794,39 |
| | 0,268 | 0,2280 | 0,0032 | | 1860,79 | 0,186 | 126,91 | 100,51 | 0,252 | 204,27 | -968,15 |
| | 0,309 | 0,2625 | 0,0024 | | 2141,91 | 0,169 | 94,50 | 74,84 | 0,252 | 209,18 | -1136,89 |
| | 0,349 | 0,2969 | 0,0017 | | 2423,04 | 0,152 | 69,61 | 55,13 | 0,252 | 209,58 | -1302,35 |
| | 0,390 | 0,3314 | 0,0012 | | 2704,17 | 0,134 | 49,90 | 39,52 | 0,252 | 205,23 | -1465,55 |
| | 0,430 | 0,3658 | 0,0008 | | 2985,29 | 0,117 | 33,90 | 26,85 | 0,252 | 195,95 | -1627,14 |
| | 0,471 | 0,4003 | 0,0005 | | 3266,42 | 0,100 | 20,66 | 16,36 | 0,252 | 181,65 | -1787,53 |
| | 0,511 | 0,4347 | 0,0002 | | 3547,55 | 0,083 | 9,51 | 7,53 | 0,252 | 162,26 | -1947,01 |
| | 0,5520 | 0,4692 | 0,0000 | | 3828,67 | 0,065 | 0,00 | 0,00 | 0,252 | 137,72 | -2105,77 |
| | 0,568 | 0,4828 | -0,0001 | | 3939,65 | 0,059 | -3,38 | 0,00 | 0,252 | 126,97 | -2166,81 |
| | 0,584 | 0,4964 | -0,0002 | | 4050,62 | 0,052 | -6,58 | 0,00 | 0,252 | 115,40 | -2227,84 |
| | 0,6000 | 0,5100 | -0,0002 | | 4161,60 | 0,045 | -9,60 | 0,00 | 0,252 | 103,00 | -2288,88 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -2692,80 |
| | c [m] | a [m] | ϵ_f [-] | | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | ϕM_n [kNm] | ϕN_n [kN] |

3.5.3.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro horní vrstvu výztuže

- analogicky předchozí kapitole, výsledky viz tab. 3.2

Tab. 3.2 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle ACI 440.1R-06 [1]

| | c [m] | $\epsilon_c [-]$ | $\alpha [-]$ | $\omega [-]$ | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | ϕM_n [kNm] | ϕN_n [kN] |
|---------|----------------|------------------|------------------|--------------|---------|-----------|-------------|--------|-----------|------------------|-----------------|
| tahové | dostředný tah | | | | | | | | | 50,91 | 236,73 |
| | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -4,42 | 17,19 |
| | 0,009 | 0,0002 | 0,0982 | 0,3363 | 7,09 | 0,297 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -5,58 | 13,29 |
| | 0,018 | 0,0004 | 0,1924 | 0,3395 | 27,78 | 0,294 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -8,91 | 1,91 |
| | 0,027 | 0,0006 | 0,2821 | 0,3431 | 61,08 | 0,291 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -14,19 | -16,41 |
| | 0,035 | 0,0009 | 0,3665 | 0,3472 | 105,82 | 0,288 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -21,16 | -41,01 |
| | 0,044 | 0,0011 | 0,4450 | 0,3518 | 160,61 | 0,284 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -29,54 | -71,15 |
| | 0,053 | 0,0013 | 0,5168 | 0,3570 | 223,83 | 0,281 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -39,02 | -105,92 |
| | 0,062 | 0,0016 | 0,5810 | 0,3630 | 293,58 | 0,278 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -49,23 | -144,28 |
| | 0,071 | 0,0018 | 0,6367 | 0,3700 | 367,67 | 0,274 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -59,79 | -185,03 |
| | 0,080 | 0,0021 | 0,6827 | 0,3782 | 443,55 | 0,270 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -70,26 | -226,77 |
| | 0,088 | 0,0024 | 0,7198 | 0,3872 | 519,56 | 0,266 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -80,36 | -268,57 |
| | 0,097 | 0,0027 | 0,7500 | 0,3958 | 595,56 | 0,261 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -90,07 | -310,37 |
| | 0,1062 | 0,0902 | 0,0127 | | 736,28 | 0,255 | 504,00 | 31,25 | 0,257 | -107,63 | -387,77 |
| c_b | | | | | | | | | | | |
| tlakové | 0,147 | 0,1251 | 0,0084 | | 1020,56 | 0,237 | 334,26 | 20,72 | 0,257 | -136,22 | -549,91 |
| | 0,188 | 0,1599 | 0,0059 | | 1304,84 | 0,220 | 235,29 | 14,59 | 0,257 | -159,98 | -709,64 |
| | 0,229 | 0,1947 | 0,0043 | | 1589,12 | 0,203 | 171,74 | 10,65 | 0,257 | -178,60 | -868,16 |
| | 0,270 | 0,2296 | 0,0032 | | 1873,40 | 0,185 | 127,47 | 7,90 | 0,257 | -191,95 | -1026,02 |
| | 0,311 | 0,2644 | 0,0024 | | 2157,68 | 0,168 | 94,86 | 5,88 | 0,257 | -199,95 | -1183,49 |
| | 0,352 | 0,2993 | 0,0017 | | 2441,96 | 0,150 | 69,85 | 4,33 | 0,257 | -202,57 | -1340,69 |
| | 0,393 | 0,3341 | 0,0013 | | 2726,24 | 0,133 | 50,05 | 3,10 | 0,257 | -199,79 | -1497,72 |
| | 0,434 | 0,3689 | 0,0008 | | 3010,52 | 0,116 | 33,99 | 2,11 | 0,257 | -191,59 | -1654,62 |
| | 0,475 | 0,4038 | 0,0005 | | 3294,79 | 0,098 | 20,71 | 1,28 | 0,257 | -177,98 | -1811,43 |
| | 0,516 | 0,4386 | 0,0002 | | 3579,07 | 0,081 | 9,53 | 0,59 | 0,257 | -158,93 | -1968,17 |
| | 0,5570 | 0,4735 | 0,0000 | | 3863,35 | 0,063 | 0,00 | 0,00 | 0,257 | -134,45 | -2124,84 |
| | 0,571 | 0,4856 | -0,0001 | | 3962,77 | 0,057 | -3,01 | 0,00 | 0,257 | -124,63 | -2179,52 |
| | 0,586 | 0,4978 | -0,0001 | | 4062,18 | 0,051 | -5,87 | 0,00 | 0,257 | -114,15 | -2234,20 |
| | 0,6000 | 0,5100 | -0,0002 | | 4161,60 | 0,045 | -8,60 | 0,00 | 0,257 | -103,00 | -2288,88 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -2692,80 |
| | c [m] | a [m] | $\epsilon_t [-]$ | | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | ϕM_n [kNm] | ϕN_n [kN] |

3.5.3.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže

1. maximální dovolené napětí ve výztuži při dlouhodobém zatížení

$$f_{f,s} \leq 0,2f_{fu} = 0,2 \times 504 = 100,8 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{f,lim} = \frac{f_{f,lim}}{E_f} = \frac{100,8}{40 \times 10^3} = 0,00252$$

2. oblast tahového porušení

$$C = -\alpha f'_c c b$$

$$\alpha = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_c} \quad \text{pro } 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003$$

$$\varepsilon_c = \frac{c}{d-c} \varepsilon_{f,lim}$$

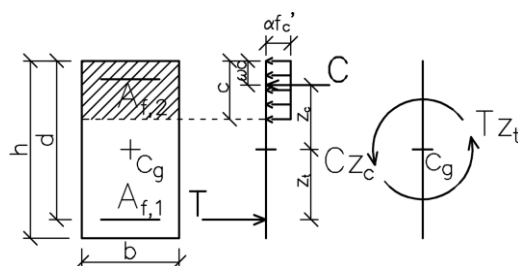
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega c$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_0 - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_0 - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_0^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \quad \text{pro } \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0,003$$

$$T = A_f f_{f,lim}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.24 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$C = -f'_c a b$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{a}{2}$$

$$a = \beta_1 c$$

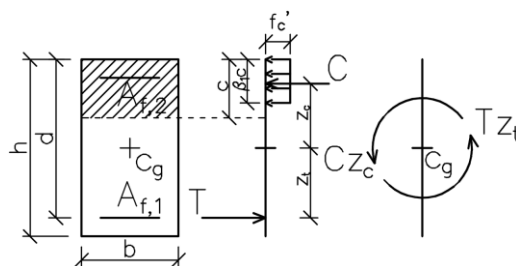
$$\beta_1 = 0,85$$

$$T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-c}{c} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.25 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_n = Cz_c + Tz_t$$

$$N_n = C + T$$

5. dostředný tah

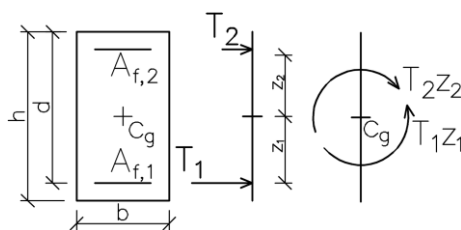
$$C = 0 \text{ kN}$$

$$T_1 = A_{f,1}f_{f,lim} = 7,92 \times 10^{-4} \times 100,8 \times 10^3 = \mathbf{79,83 \text{ kN}}$$

$$T_2 = A_{f,2}f_{f,lim} = 0,62 \times 10^{-4} \times 100,8 \times 10^3 = \mathbf{6,25 \text{ kN}}$$

$$M_n = T_1z_1 - T_2z_2 = 79,83 \times 0,252 - 6,25 \times 0,257 = \mathbf{18,51 \text{ kNm}}$$

$$N_n = \sum T = 79,83 + 6,25 = \mathbf{86,08 \text{ kN}}$$



Obr. 3.26 Dostředný tah

6. dostředný tlak

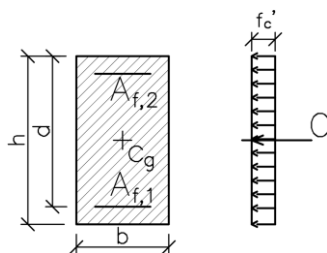
$$C = -bf_c' = -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 10^3 = \mathbf{-5760 \text{ kN}}$$

$$T_1 = A_{f,1}f_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0 = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$T_2 = A_{f,2}f_f = 0,62 \times 10^{-4} \times 0 = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$M_n = \mathbf{0 \text{ kNm}}$$

$$N_n = C = \mathbf{-5760 \text{ kN}}$$



Obr. 3.27 Dostředný tlak

7. omezení únosnosti tlačенého prvku

$$P_n(max) = 0,80P_0 = -0,80 \times 5760 = -4608 \text{ kN}$$

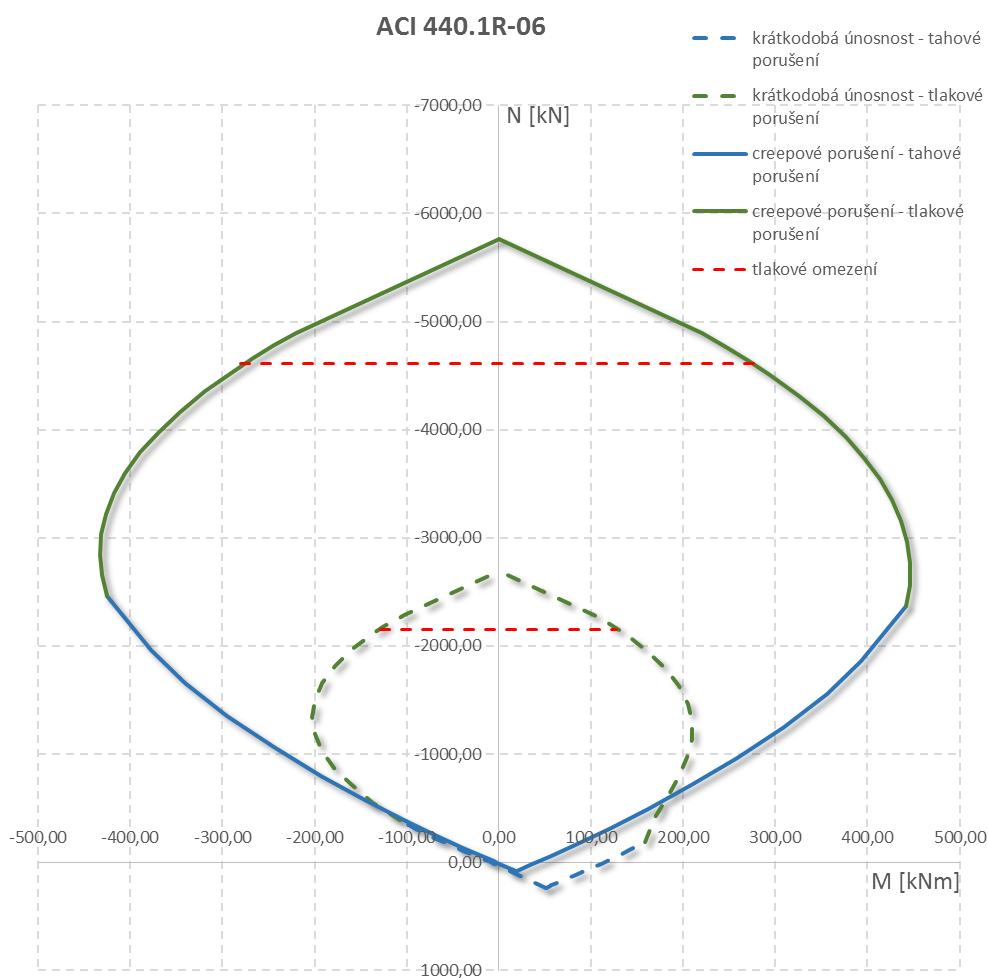
Tab. 3.3 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle ACI 440.1R-06 [1]

| | c [m] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | M_n [kNm] | N_n [kN] |
|---------|----------------|------------------|------------------|--------------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|------------|
| tahové | dostředný tah | | | | | | | | | 18,51 | 86,08 |
| | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 20,12 | 79,83 |
| | 0,025 | 0,0001 | 0,0586 | 0,3350 | 14,06 | 0,292 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 24,22 | 65,77 |
| | 0,050 | 0,0003 | 0,1202 | 0,3370 | 57,72 | 0,283 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 36,46 | 22,11 |
| | 0,075 | 0,0004 | 0,1850 | 0,3392 | 133,22 | 0,275 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 56,70 | -53,39 |
| | 0,100 | 0,0006 | 0,2529 | 0,3419 | 242,74 | 0,266 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 84,64 | -162,91 |
| | 0,125 | 0,0007 | 0,3235 | 0,3450 | 388,20 | 0,257 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 119,84 | -308,37 |
| | 0,150 | 0,0009 | 0,3965 | 0,3488 | 570,92 | 0,248 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 161,52 | -491,08 |
| | 0,175 | 0,0012 | 0,4709 | 0,3535 | 791,03 | 0,238 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 208,49 | -711,20 |
| | 0,200 | 0,0014 | 0,5451 | 0,3595 | 1046,53 | 0,228 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 258,84 | -966,70 |
| | 0,225 | 0,0017 | 0,6164 | 0,3672 | 1331,48 | 0,217 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 309,55 | -1251,65 |
| | 0,250 | 0,0021 | 0,6804 | 0,3777 | 1633,02 | 0,206 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 355,81 | -1553,18 |
| | 0,275 | 0,0025 | 0,7335 | 0,3910 | 1936,51 | 0,192 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 392,87 | -1856,67 |
| c_b | 0,3000 | 0,2550 | 0,0025 | | 2448,00 | 0,173 | 100,80 | 79,83 | 0,252 | 442,40 | -2368,17 |
| tlakové | 0,323 | 0,2745 | 0,0021 | | 2634,94 | 0,163 | 85,14 | 67,43 | 0,252 | 445,86 | -2567,51 |
| | 0,346 | 0,2939 | 0,0018 | | 2821,88 | 0,153 | 71,55 | 56,66 | 0,252 | 446,10 | -2765,21 |
| | 0,369 | 0,3134 | 0,0015 | | 3008,81 | 0,143 | 59,64 | 47,24 | 0,252 | 443,04 | -2961,58 |
| | 0,392 | 0,3329 | 0,0012 | | 3195,75 | 0,134 | 49,14 | 38,92 | 0,252 | 436,61 | -3156,84 |
| | 0,415 | 0,3524 | 0,0010 | | 3382,69 | 0,124 | 39,79 | 31,51 | 0,252 | 426,78 | -3351,18 |
| | 0,437 | 0,3718 | 0,0008 | | 3569,63 | 0,114 | 31,42 | 24,89 | 0,252 | 413,50 | -3544,74 |
| | 0,460 | 0,3913 | 0,0006 | | 3756,57 | 0,104 | 23,89 | 18,92 | 0,252 | 396,75 | -3737,65 |
| | 0,483 | 0,4108 | 0,0004 | | 3943,51 | 0,095 | 17,07 | 13,52 | 0,252 | 376,50 | -3929,99 |
| | 0,506 | 0,4303 | 0,0003 | | 4130,44 | 0,085 | 10,86 | 8,60 | 0,252 | 352,73 | -4121,84 |
| | 0,529 | 0,4497 | 0,0001 | | 4317,38 | 0,075 | 5,20 | 4,12 | 0,252 | 325,43 | -4313,27 |
| | 0,5520 | 0,4692 | 0,0000 | | 4504,32 | 0,065 | 0,00 | 0,00 | 0,252 | 294,58 | -4504,32 |
| | 0,568 | 0,4828 | -0,0001 | | 4634,88 | 0,059 | -3,38 | 0,00 | 0,252 | 271,60 | -4634,88 |
| | 0,584 | 0,4964 | -0,0002 | | 4765,44 | 0,052 | -6,58 | 0,00 | 0,252 | 246,85 | -4765,44 |
| | 0,6000 | 0,5100 | -0,0002 | | 4896,00 | 0,045 | -9,60 | 0,00 | 0,252 | 220,32 | -4896,00 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | c [m] | a [m] | ϵ_f [-] | | F_c [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | F_t [kN] | z_t [m] | M_n [kNm] | N_n [kN] |

3.5.3.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže

Tab. 3.4 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle ACI 440.1R-06 [1]

| | c [m] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | M_n [kNm] | N_n [kN] |
|---------|----------------|------------------|------------------|--------------|---------|-----------|-------------|--------|-----------|-------------|------------|
| tahové | dostředný tah | | | | | | | | | 18,51 | 86,08 |
| | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -1,61 | 6,25 |
| | 0,025 | 0,0001 | 0,0591 | 0,3350 | 14,32 | 0,292 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -5,78 | -8,07 |
| | 0,050 | 0,0003 | 0,1214 | 0,3370 | 58,80 | 0,283 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -18,25 | -52,55 |
| | 0,076 | 0,0004 | 0,1868 | 0,3393 | 135,74 | 0,274 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -38,84 | -129,49 |
| | 0,101 | 0,0006 | 0,2554 | 0,3420 | 247,38 | 0,265 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -67,28 | -241,13 |
| | 0,126 | 0,0007 | 0,3268 | 0,3452 | 395,67 | 0,256 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -103,08 | -389,42 |
| | 0,151 | 0,0010 | 0,4005 | 0,3490 | 581,92 | 0,247 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -145,44 | -575,67 |
| | 0,177 | 0,0012 | 0,4756 | 0,3538 | 806,22 | 0,238 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -193,10 | -799,97 |
| | 0,202 | 0,0015 | 0,5504 | 0,3599 | 1066,29 | 0,227 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -244,04 | -1060,04 |
| | 0,227 | 0,0018 | 0,6220 | 0,3679 | 1355,68 | 0,216 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -295,06 | -1349,43 |
| | 0,252 | 0,0021 | 0,6857 | 0,3789 | 1660,51 | 0,204 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -341,06 | -1654,26 |
| | 0,277 | 0,0025 | 0,7383 | 0,3923 | 1966,75 | 0,191 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -377,51 | -1960,50 |
| c_b | 0,3027 | 0,2573 | 0,0025 | | 2470,17 | 0,171 | 100,80 | 6,25 | 0,257 | -424,86 | -2463,92 |
| tlakové | 0,326 | 0,2770 | 0,0021 | | 2658,81 | 0,162 | 85,14 | 5,28 | 0,257 | -430,81 | -2653,53 |
| | 0,349 | 0,2966 | 0,0018 | | 2847,44 | 0,152 | 71,55 | 4,44 | 0,257 | -433,08 | -2843,00 |
| | 0,372 | 0,3163 | 0,0015 | | 3036,07 | 0,142 | 59,64 | 3,70 | 0,257 | -431,68 | -3032,37 |
| | 0,395 | 0,3359 | 0,0012 | | 3224,70 | 0,132 | 49,14 | 3,05 | 0,257 | -426,59 | -3221,65 |
| | 0,418 | 0,3556 | 0,0010 | | 3413,33 | 0,122 | 39,79 | 2,47 | 0,257 | -417,82 | -3410,86 |
| | 0,441 | 0,3752 | 0,0008 | | 3601,96 | 0,112 | 31,42 | 1,95 | 0,257 | -405,35 | -3600,01 |
| | 0,465 | 0,3949 | 0,0006 | | 3790,59 | 0,103 | 23,89 | 1,48 | 0,257 | -389,19 | -3789,11 |
| | 0,488 | 0,4145 | 0,0004 | | 3979,23 | 0,093 | 17,07 | 1,06 | 0,257 | -369,34 | -3978,17 |
| | 0,511 | 0,4342 | 0,0003 | | 4167,86 | 0,083 | 10,86 | 0,67 | 0,257 | -345,79 | -4167,18 |
| | 0,534 | 0,4538 | 0,0001 | | 4356,49 | 0,073 | 5,20 | 0,32 | 0,257 | -318,54 | -4356,17 |
| | 0,5570 | 0,4735 | 0,0000 | | 4545,12 | 0,063 | 0,00 | 0,00 | 0,257 | -287,59 | -4545,12 |
| | 0,571 | 0,4856 | -0,0001 | | 4662,08 | 0,057 | -3,01 | 0,00 | 0,257 | -266,59 | -4662,08 |
| | 0,586 | 0,4978 | -0,0001 | | 4779,04 | 0,051 | -5,87 | 0,00 | 0,257 | -244,17 | -4779,04 |
| | 0,6000 | 0,5100 | -0,0002 | | 4896,00 | 0,045 | -8,60 | 0,00 | 0,257 | -220,32 | -4896,00 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | c [m] | a [m] | ϵ_t [-] | | C [kN] | z_c [m] | f_t [MPa] | T [kN] | z_t [m] | M_n [kNm] | N_n [kN] |



Obr. 3.28 Interakční diagram průřezu dle ACI 440.1R-06 [1]

Pozn.: Vyšší únosnost interakčního diagramu creepového porušení oproti krátkodobé únosnosti je dána absencí součinitele 0,85 a redukčního faktoru ϕ .

dostředný tlak krátkodobé únosnosti

$$\begin{aligned}\phi N_n &= \phi C = \phi(-bh0,85f'_c) = \\ &= 0,55 \times (-0,32 \times 0,6 \times 0,85 \times 30 \times 10^3) = 2692,80 \text{ kN}\end{aligned}$$

dostředný tlak creepového porušení

$$\begin{aligned}N_n &= C = -bhf'_c = \\ &= -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 10^3 = 5760,00 \text{ kN}\end{aligned}$$

3.5.4 Interakční diagram dle ISIS Canada [2]

3.5.4.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže

1. součinitele bezpečnosti betonu a FRP výztuže

$$\phi_c = 0,65$$

$$\phi_f = 0,75$$

2. oblast tahového porušení

$$C = \alpha \phi_c f'_c \beta c b$$

$\alpha, \beta \dots$ tab. B.1 až B.3 [2] v závislosti na $\varepsilon_c / \varepsilon_0$

$$\varepsilon_c = \frac{c}{d-c} \varepsilon_{frpu}$$

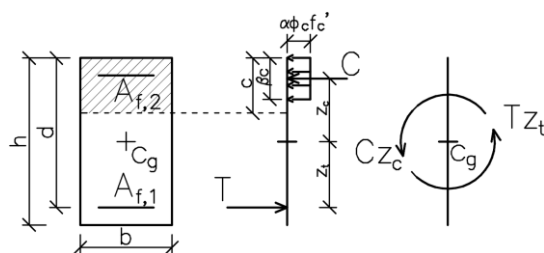
$$\varepsilon_0 = \frac{f'_c}{E_c} \frac{n}{n-1}$$

$$n = 0,8 + \frac{f'_c}{17}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta c}{2}$$

$$T = A_{frp} \phi_f \varepsilon_{frpu} E_{frp}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.29 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$C = \alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 c b$$

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c \geq 0,67$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2}$$

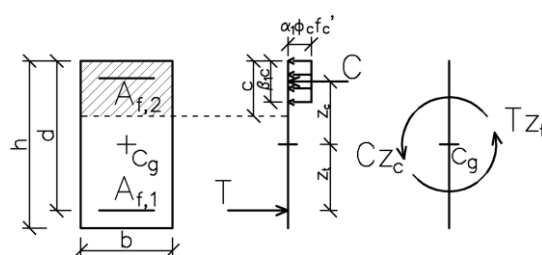
$$T = A_{frp} \phi_f f_{frp}$$

$$f_{frp} = \varepsilon_{frp} E_f$$

$$\varepsilon_{frp} = \frac{d-c}{c} \varepsilon_{cu}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.30 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_r = C z_c + T z_t$$

$$N_r = C + T$$

5. dostředný tah

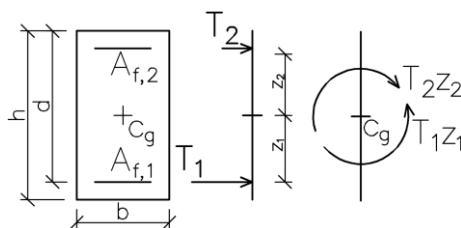
$$C = 0 \text{ kN}$$

$$T_1 = A_{f,1} \phi_f f_{frpu} = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,75 \times 630 \times 10^3 = 374,22 \text{ kN}$$

$$T_2 = A_{f,2} \phi_f f_{frpu} = 0,62 \times 10^{-4} \times 0,75 \times 630 \times 10^3 = 29,30 \text{ kN}$$

$$M_r = T_1 z_1 - T_2 z_2 = 374,22 \times 0,252 - 29,30 \times 0,257 = 86,77 \text{ kNm}$$

$$N_r = T_1 + T_2 = 374,22 + 29,30 = 403,52 \text{ kN}$$



Obr. 3.31 Dostředný tah

6. dostředný tlak

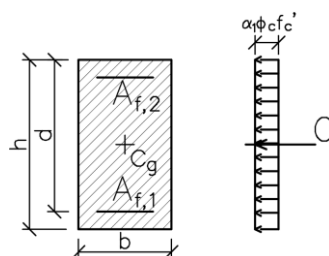
$$C = -\alpha_1 b h \phi_c f'_c = -0,805 \times 0,32 \times 0,6 \times 0,65 \times 30 \times 10^3 = -3013,92 \text{ kN}$$

$$T_1 = 0 \text{ kN}$$

$$T_2 = 0 \text{ kN}$$

$$M_r = 0 \text{ kNm}$$

$$N_r = P_0 = C = -3013,92 \text{ kN}$$



Obr. 3.32 Dostředný tlak

7. omezení únosnosti tlačенého prvku

$$P_{r,max} = 0,80 P_0 = -0,80 \times 3013,92 = -2411,14 \text{ kN}$$

Tab. 3.5 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle ISIS Canada [2]

| | c [m] | α [-] | β [-] | ϵ_c [-] | ϵ_c / ϵ_0 | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |
|------------------|----------------|----------------|---------------|----------------------|---------------------------|--------|-----------|---------|-----------|-------------|------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 86,77 | 403,52 |
| | 0,000 | 0 | 0 | 0,0000 | 0,0 | 374,22 | 0,252 | 0,00 | 0,300 | 94,30 | 374,22 |
| | 0,020 | 0,390 | 0,647 | 0,0006 | 0,3 | 374,22 | 0,252 | 31,61 | 0,294 | 103,58 | 342,61 |
| | 0,040 | 0,702 | 0,674 | 0,0012 | 0,6 | 374,22 | 0,252 | 118,53 | 0,286 | 128,26 | 255,69 |
| | 0,060 | 0,921 | 0,729 | 0,0019 | 1,0 | 374,22 | 0,252 | 252,29 | 0,278 | 164,45 | 121,93 |
| | 0,080 | 0,926 | 0,805 | 0,0027 | 1,4 | 374,22 | 0,252 | 373,47 | 0,268 | 194,28 | 0,75 |
| c_b | 0,1004 | 0,805 | 0,895 | 0,0158 | 630,00 | 374,22 | 0,252 | 451,21 | 0,255 | 209,40 | -76,99 |
| tlakové porušení | 0,135 | 0,805 | 0,895 | 0,0108 | 432,00 | 256,61 | 0,252 | 607,40 | 0,240 | 210,16 | -350,79 |
| | 0,170 | 0,805 | 0,895 | 0,0079 | 315,00 | 187,11 | 0,252 | 763,59 | 0,224 | 218,19 | -576,48 |
| | 0,205 | 0,805 | 0,895 | 0,0059 | 237,74 | 141,22 | 0,252 | 919,78 | 0,208 | 227,31 | -778,56 |
| | 0,239 | 0,805 | 0,895 | 0,0046 | 182,90 | 108,64 | 0,252 | 1075,97 | 0,193 | 234,93 | -967,32 |
| | 0,274 | 0,805 | 0,895 | 0,0035 | 141,97 | 84,33 | 0,252 | 1232,15 | 0,177 | 239,78 | -1147,82 |
| | 0,309 | 0,805 | 0,895 | 0,0028 | 110,25 | 65,49 | 0,252 | 1388,34 | 0,162 | 241,15 | -1322,85 |
| | 0,344 | 0,805 | 0,895 | 0,0021 | 84,94 | 50,46 | 0,252 | 1544,53 | 0,146 | 238,62 | -1494,07 |
| | 0,378 | 0,805 | 0,895 | 0,0016 | 64,29 | 38,19 | 0,252 | 1700,72 | 0,131 | 231,93 | -1662,53 |
| | 0,413 | 0,805 | 0,895 | 0,0012 | 47,10 | 27,98 | 0,252 | 1856,91 | 0,115 | 220,90 | -1828,93 |
| | 0,448 | 0,805 | 0,895 | 0,0008 | 32,59 | 19,36 | 0,252 | 2013,10 | 0,100 | 205,42 | -1993,74 |
| | 0,483 | 0,805 | 0,895 | 0,0005 | 20,16 | 11,98 | 0,252 | 2169,28 | 0,084 | 185,40 | -2157,31 |
| | 0,517 | 0,805 | 0,895 | 0,0002 | 9,40 | 5,59 | 0,252 | 2325,47 | 0,069 | 160,76 | -2319,89 |
| | 0,5520 | 0,805 | 0,895 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,252 | 2481,66 | 0,053 | 131,48 | -2481,66 |
| | 0,568 | 0,805 | 0,895 | -0,0001 | -3,94 | 0,00 | 0,252 | 2553,59 | 0,046 | 117,01 | -2553,59 |
| | 0,584 | 0,805 | 0,895 | -0,0002 | -7,67 | 0,00 | 0,252 | 2625,53 | 0,039 | 101,50 | -2625,53 |
| | 0,6000 | 0,805 | 0,895 | -0,0003 | -11,20 | 0,00 | 0,252 | 2697,46 | 0,032 | 84,97 | -2697,46 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3013,92 |
| | c [m] | α_1 [-] | β_1 [m] | ϵ_{frp} [-] | f_{frp} [MPa] | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |

3.5.4.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro vrchní vrstvu výztuže

Tab. 3.6 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle ISIS Canada [2]

| | c [m] | α [-] | β [-] | ε_c [-] | $\varepsilon_c / \varepsilon_0$ | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |
|------------------|----------------|----------------|---------------|-------------------------|---------------------------------|--------|-----------|---------|-----------|-------------|------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 86,77 | 403,52 |
| | 0,000 | 0 | 0 | 0,0000 | 0,0 | 29,30 | 0,257 | 0,00 | 0,300 | -7,53 | 29,30 |
| | 0,020 | 0,390 | 0,647 | 0,0006 | 0,3 | 29,30 | 0,257 | 31,89 | 0,293 | -16,89 | -2,60 |
| | 0,041 | 0,702 | 0,674 | 0,0012 | 0,6 | 29,30 | 0,257 | 119,60 | 0,286 | -41,78 | -90,31 |
| | 0,061 | 0,921 | 0,729 | 0,0019 | 1,0 | 29,30 | 0,257 | 254,57 | 0,278 | -78,26 | -225,28 |
| | 0,081 | 0,926 | 0,805 | 0,0027 | 1,4 | 29,30 | 0,257 | 376,85 | 0,267 | -108,30 | -347,56 |
| c_b | 0,1013 | 0,805 | 0,895 | 0,0158 | 630,00 | 29,30 | 0,257 | 455,30 | 0,255 | -123,48 | -426,00 |
| tlakové porušení | 0,136 | 0,805 | 0,895 | 0,0108 | 432,00 | 20,09 | 0,257 | 612,90 | 0,239 | -151,64 | -592,81 |
| | 0,171 | 0,805 | 0,895 | 0,0079 | 315,00 | 14,65 | 0,257 | 770,50 | 0,223 | -175,82 | -755,86 |
| | 0,206 | 0,805 | 0,895 | 0,0059 | 237,74 | 11,05 | 0,257 | 928,11 | 0,208 | -195,53 | -917,05 |
| | 0,241 | 0,805 | 0,895 | 0,0046 | 182,90 | 8,51 | 0,257 | 1085,71 | 0,192 | -210,57 | -1077,21 |
| | 0,277 | 0,805 | 0,895 | 0,0035 | 141,97 | 6,60 | 0,257 | 1243,31 | 0,176 | -220,82 | -1236,71 |
| | 0,312 | 0,805 | 0,895 | 0,0028 | 110,25 | 5,13 | 0,257 | 1400,92 | 0,161 | -226,24 | -1395,79 |
| | 0,347 | 0,805 | 0,895 | 0,0021 | 84,94 | 3,95 | 0,257 | 1558,52 | 0,145 | -226,79 | -1554,57 |
| | 0,382 | 0,805 | 0,895 | 0,0016 | 64,29 | 2,99 | 0,257 | 1716,12 | 0,129 | -222,46 | -1713,14 |
| | 0,417 | 0,805 | 0,895 | 0,0012 | 47,10 | 2,19 | 0,257 | 1873,73 | 0,113 | -213,22 | -1871,54 |
| | 0,452 | 0,805 | 0,895 | 0,0008 | 32,59 | 1,52 | 0,257 | 2031,33 | 0,098 | -199,06 | -2029,82 |
| | 0,487 | 0,805 | 0,895 | 0,0005 | 20,16 | 0,94 | 0,257 | 2188,93 | 0,082 | -179,99 | -2188,00 |
| | 0,522 | 0,805 | 0,895 | 0,0002 | 9,40 | 0,44 | 0,257 | 2346,54 | 0,066 | -155,99 | -2346,10 |
| | 0,5570 | 0,805 | 0,895 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,257 | 2504,14 | 0,051 | -127,07 | -2504,14 |
| | 0,571 | 0,805 | 0,895 | -0,0001 | -3,51 | 0,00 | 0,257 | 2568,58 | 0,044 | -113,86 | -2568,58 |
| | 0,586 | 0,805 | 0,895 | -0,0002 | -6,85 | 0,00 | 0,257 | 2633,02 | 0,038 | -99,83 | -2633,02 |
| | 0,6000 | 0,805 | 0,895 | -0,0003 | -10,03 | 0,00 | 0,257 | 2697,46 | 0,032 | -84,97 | -2697,46 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3013,92 |
| | c [m] | α_1 [-] | β_1 [m] | ε_{frp} [-] | f_{frp} [MPa] | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |

3.5.4.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže

1. maximální dovolené napětí ve výztuži při dlouhodobém zatížení

$$f_{frp,s} \leq 0,2 \text{ až } 0,25 f_{frpu} = 0,25 \times 630 = 157,5 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{frp,lim} = \frac{f_{frp,s}}{E_f} = \frac{157,5}{40 \times 10^3} = 0,0039375$$

2. oblast tahového porušení

$$C = f'_c \beta c b$$

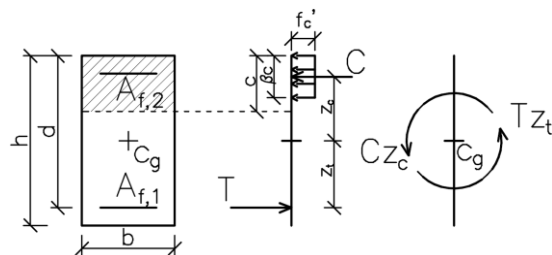
$$\beta \dots \text{tab. B.1 až B.3 [2] v závislosti na } \varepsilon_c / \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_c = \frac{c}{d-c} \varepsilon_{frp,lim}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta c}{2}$$

$$T = A_{frp} \varepsilon_{frp,lim} E_{frp}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.33 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$C = f'_c \beta_1 c b$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67$$

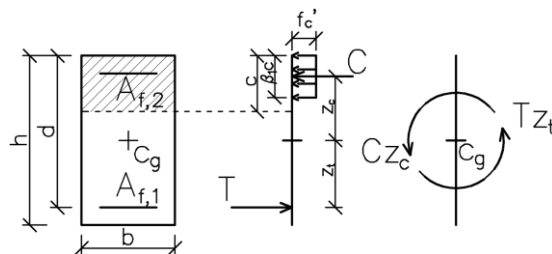
$$z_c = \frac{h}{2} - \frac{\beta_1 c}{2}$$

$$T = A_{frp} f_{frp}$$

$$f_{frp} = \varepsilon_{frp} E_f$$

$$\varepsilon_{frp} = \frac{d-c}{c} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.34 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_n = C z_c + T z_t$$

$$N_n = C + T$$

5. dostředný tah

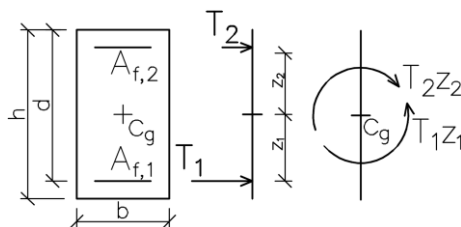
$$C = 0 \text{ kN}$$

$$T_1 = A_{f,1} \phi_f f_{frp,s} = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,75 \times 157,5 \times 10^3 = 93,56 \text{ kN}$$

$$T_2 = A_{f,2} \phi_f f_{frp,s} = 0,62 \times 10^{-4} \times 0,75 \times 157,5 \times 10^3 = 7,32 \text{ kN}$$

$$M_r = T_1 z_1 - T_2 z_2 = 93,56 \times 0,252 - 7,32 \times 0,257 = 21,69 \text{ kNm}$$

$$N_r = T_1 + T_2 = 93,56 + 7,32 = 100,88 \text{ kN}$$



Obr. 3.35 Dostředný tah

6. dostředný tlak

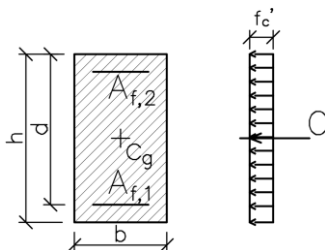
$$C = -b h f'_c = -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 10^3 = -5760 \text{ kN}$$

$$T_1 = 0 \text{ kN}$$

$$T_2 = 0 \text{ kN}$$

$$M_r = 0 \text{ kNm}$$

$$N_r = P_0 = C = -5760 \text{ kN}$$



Obr. 3.36 Dostředný tlak

7. omezení únosnosti tlačného prvku

$$P_{r,max} = 0,80 P_0 = -0,80 \times 5760 = -4608 \text{ kN}$$

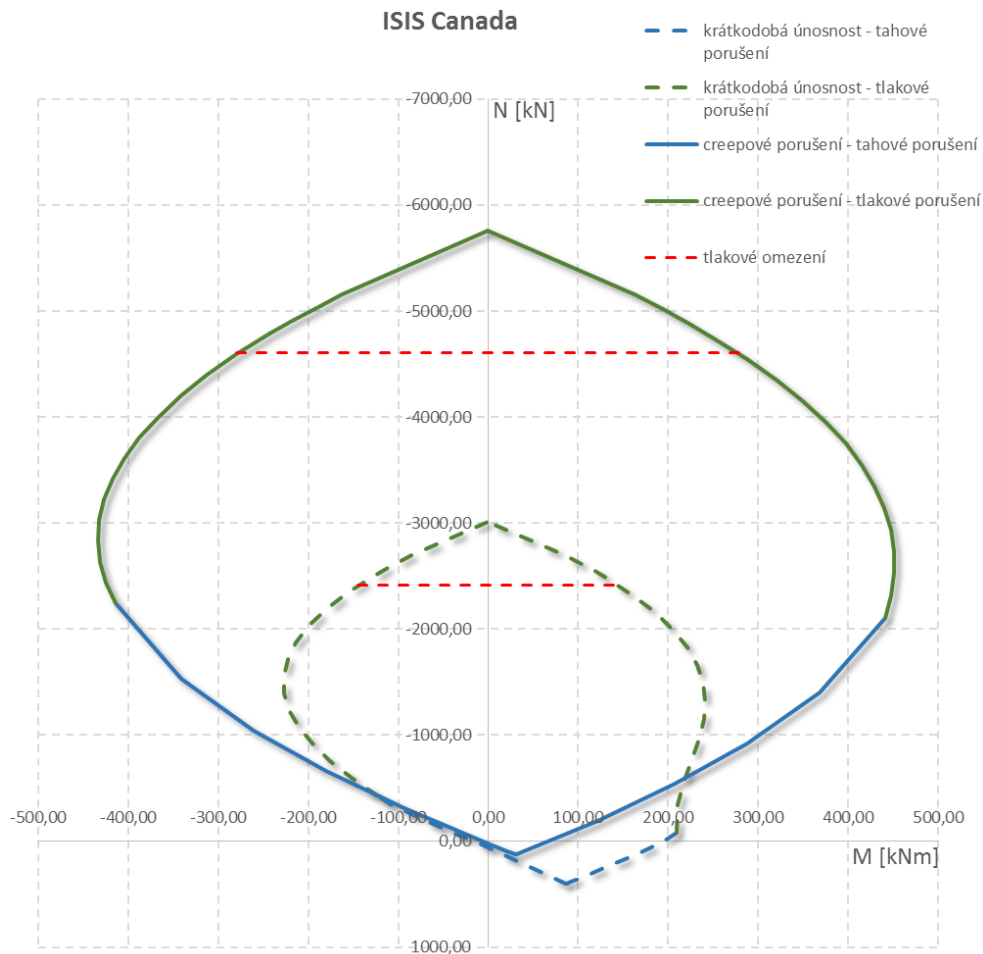
Tab. 3.7 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle ISIS Canada [2]

| | c [m] | β [-] | ϵ_c [-] | ϵ_c / ϵ_0 | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |
|------------------|----------------|---------------|----------------------|---------------------------|--------|-----------|---------|-----------|-------------|------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | 21,69 | 100,88 |
| | 0,000 | 0 | 0,0000 | 0,0 | 124,74 | 0,252 | 0,00 | 0,300 | 31,43 | 124,74 |
| | 0,052 | 0,634 | 0,0004 | 0,2 | 124,74 | 0,252 | 316,21 | 0,284 | 121,09 | -191,47 |
| | 0,104 | 0,664 | 0,0009 | 0,5 | 124,74 | 0,252 | 662,34 | 0,266 | 207,29 | -537,60 |
| | 0,156 | 0,698 | 0,0015 | 0,8 | 124,74 | 0,252 | 1044,38 | 0,246 | 287,94 | -919,64 |
| | 0,208 | 0,766 | 0,0024 | 1,2 | 124,74 | 0,252 | 1528,16 | 0,220 | 368,25 | -1403,42 |
| | 0,2598 | 0,895 | 0,0039 | 157,50 | 124,74 | 0,252 | 2231,90 | 0,184 | 441,56 | -2107,16 |
| tlakové porušení | 0,282 | 0,895 | 0,0033 | 133,81 | 105,97 | 0,252 | 2425,04 | 0,174 | 447,92 | -2319,07 |
| | 0,305 | 0,895 | 0,0028 | 113,61 | 89,98 | 0,252 | 2618,19 | 0,164 | 451,10 | -2528,21 |
| | 0,327 | 0,895 | 0,0024 | 96,18 | 76,18 | 0,252 | 2811,33 | 0,154 | 450,95 | -2735,16 |
| | 0,350 | 0,895 | 0,0020 | 81,00 | 64,15 | 0,252 | 3004,48 | 0,144 | 447,36 | -2940,33 |
| | 0,372 | 0,895 | 0,0017 | 67,65 | 53,58 | 0,252 | 3197,62 | 0,133 | 440,25 | -3144,04 |
| | 0,395 | 0,895 | 0,0014 | 55,82 | 44,21 | 0,252 | 3390,77 | 0,123 | 429,55 | -3346,56 |
| | 0,417 | 0,895 | 0,0011 | 45,27 | 35,85 | 0,252 | 3583,91 | 0,113 | 415,23 | -3548,06 |
| | 0,440 | 0,895 | 0,0009 | 35,80 | 28,35 | 0,252 | 3777,06 | 0,103 | 397,23 | -3748,71 |
| | 0,462 | 0,895 | 0,0007 | 27,24 | 21,58 | 0,252 | 3970,20 | 0,093 | 375,53 | -3948,63 |
| | 0,485 | 0,895 | 0,0005 | 19,48 | 15,43 | 0,252 | 4163,35 | 0,083 | 350,11 | -4147,92 |
| | 0,507 | 0,895 | 0,0003 | 12,41 | 9,83 | 0,252 | 4356,49 | 0,073 | 320,93 | -4346,66 |
| | 0,530 | 0,895 | 0,0001 | 5,94 | 4,71 | 0,252 | 4549,64 | 0,063 | 287,99 | -4544,93 |
| | 0,5520 | 0,895 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,252 | 4742,78 | 0,053 | 251,27 | -4742,78 |
| | 0,568 | 0,895 | -0,0001 | -3,94 | 0,00 | 0,252 | 4880,26 | 0,046 | 223,61 | -4880,26 |
| | 0,584 | 0,895 | -0,0002 | -7,67 | 0,00 | 0,252 | 5017,73 | 0,039 | 193,99 | -5017,73 |
| | 0,6000 | 0,895 | -0,0003 | -11,20 | 0,00 | 0,252 | 5155,20 | 0,032 | 162,39 | -5155,20 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | c [m] | β_1 [m] | ϵ_{frp} [-] | f_{frp} [MPa] | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |

3.5.4.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže

Tab. 3.8 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle ISIS Canada [2]

| | c [m] | β [-] | ϵ_c [-] | ϵ_c / ϵ_0 | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |
|------------------|----------------|---------------|----------------------|---------------------------|--------|-----------|---------|-----------|-------------|------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | 21,69 | 100,88 |
| | 0,000 | 0 | 0,0000 | 0,0 | 9,77 | 0,257 | 0,00 | 0,300 | -2,51 | 9,77 |
| | 0,052 | 0,634 | 0,0004 | 0,2 | 9,77 | 0,257 | 319,07 | 0,283 | -92,93 | -309,31 |
| | 0,105 | 0,664 | 0,0009 | 0,5 | 9,77 | 0,257 | 668,34 | 0,265 | -179,75 | -658,57 |
| | 0,157 | 0,698 | 0,0015 | 0,8 | 9,77 | 0,257 | 1053,84 | 0,245 | -260,82 | -1044,07 |
| | 0,210 | 0,766 | 0,0024 | 1,2 | 9,77 | 0,257 | 1542,01 | 0,220 | -341,27 | -1532,24 |
| c_b | 0,2621 | 0,895 | 0,0039 | 157,50 | 9,77 | 0,257 | 2252,11 | 0,183 | -413,98 | -2242,35 |
| tlakové porušení | 0,285 | 0,895 | 0,0033 | 133,81 | 8,30 | 0,257 | 2447,01 | 0,173 | -424,37 | -2438,71 |
| | 0,307 | 0,895 | 0,0028 | 113,61 | 7,04 | 0,257 | 2641,90 | 0,162 | -430,86 | -2634,86 |
| | 0,330 | 0,895 | 0,0024 | 96,18 | 5,96 | 0,257 | 2836,80 | 0,152 | -433,44 | -2830,84 |
| | 0,353 | 0,895 | 0,0020 | 81,00 | 5,02 | 0,257 | 3031,69 | 0,142 | -432,09 | -3026,67 |
| | 0,376 | 0,895 | 0,0017 | 67,65 | 4,19 | 0,257 | 3226,59 | 0,132 | -426,82 | -3222,39 |
| | 0,398 | 0,895 | 0,0014 | 55,82 | 3,46 | 0,257 | 3421,48 | 0,122 | -417,62 | -3418,02 |
| | 0,421 | 0,895 | 0,0011 | 45,27 | 2,81 | 0,257 | 3616,38 | 0,112 | -404,48 | -3613,57 |
| | 0,444 | 0,895 | 0,0009 | 35,80 | 2,22 | 0,257 | 3811,27 | 0,101 | -387,40 | -3809,05 |
| | 0,466 | 0,895 | 0,0007 | 27,24 | 1,69 | 0,257 | 4006,17 | 0,091 | -366,38 | -4004,48 |
| | 0,489 | 0,895 | 0,0005 | 19,48 | 1,21 | 0,257 | 4201,06 | 0,081 | -341,41 | -4199,85 |
| | 0,512 | 0,895 | 0,0003 | 12,41 | 0,77 | 0,257 | 4395,95 | 0,071 | -312,50 | -4395,19 |
| | 0,534 | 0,895 | 0,0001 | 5,94 | 0,37 | 0,257 | 4590,85 | 0,061 | -279,65 | -4590,48 |
| | 0,5570 | 0,895 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,257 | 4785,74 | 0,051 | -242,84 | -4785,74 |
| | 0,571 | 0,895 | -0,0001 | -3,51 | 0,00 | 0,257 | 4908,90 | 0,044 | -217,60 | -4908,90 |
| | 0,586 | 0,895 | -0,0002 | -6,85 | 0,00 | 0,257 | 5032,05 | 0,038 | -190,79 | -5032,05 |
| | 0,6000 | 0,895 | -0,0003 | -10,03 | 0,00 | 0,257 | 5155,20 | 0,032 | -162,39 | -5155,20 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | c [m] | β_1 [m] | ϵ_{frp} [-] | f_{frp} [MPa] | T [kN] | z_t [m] | C [kN] | z_c [m] | M_r [kNm] | N_r [kN] |



Obr. 3.37 Interakční diagram průřezu dle ISIS Canada [2]

3.5.5 Interakční diagram dle CNR-DT 203/2006 [3]

3.5.5.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže

1. součinitele bezpečnosti betonu a FRP výztuže

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\gamma_f = 1,5$$

$$\eta_a = 0,8$$

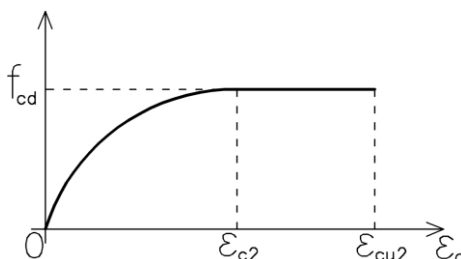
$$f_{fd} = \eta_a \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = 0,8 \frac{630}{1,5} = 336 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,9 \eta_a \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = 0,9 \times 0,8 \frac{0,01575}{1,5} = 0,00756$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = \mathbf{20 \text{ MPa}}$$

2. oblast tahového porušení

$$N_c = \alpha f_{cd} x b$$



Obr. 3.38 Parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu v tlaku

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{c2}^2} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d-x} \varepsilon_{fd}$$

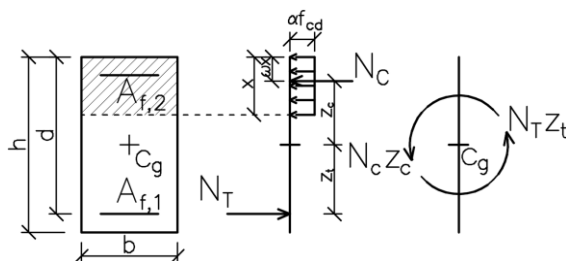
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_{c2})} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$N_T = A_f \varepsilon_{fd} E_f$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.39 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$N_c = \alpha f_{cd} x b$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

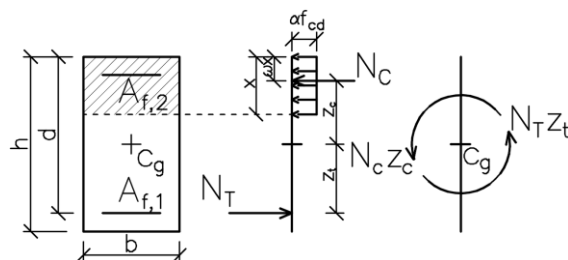
$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}$$

$$N_T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.40 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_{Rd} = N_c z_c + N_T z_t$$

$$N_{Rd} = N_c + N_T$$

5. dostředný tah

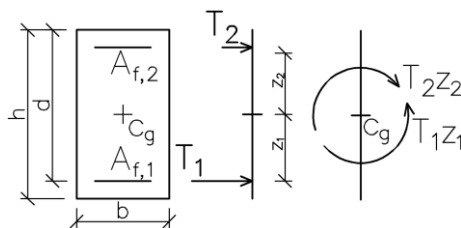
$$N_c = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = A_{f,1} \varepsilon_{fd} E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,00756 \times 40 \times 10^6 = 239,50 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = A_{f,2} \varepsilon_{fd} E_f = 0,62 \times 10^{-4} \times 0,00756 \times 40 \times 10^6 = 18,75 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = N_{T,1} \times z_1 - N_{T,2} \times z_2 = 239,50 \times 0,252 - 18,75 \times 0,257 = 55,54 \text{ kNm}$$

$$N_{Rd} = N_{T,1} + N_{T,2} = 239,50 + 18,75 = 258,25 \text{ kN}$$



Obr. 3.41 Dostředný tah

6. dostředný tlak

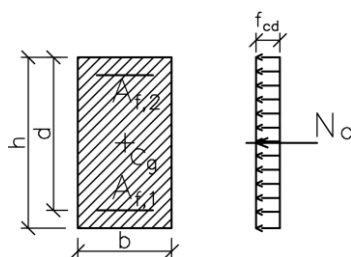
$$N_c = bh f_{cd} = -0,32 \times 0,6 \times 20 \times 10^3 = -\mathbf{3840 \text{ kN}}$$

$$N_{T,1} = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$N_{T,2} = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$M_{Rd} = \mathbf{0 \text{ kNm}}$$

$$N_{Rd} = N_c = -\mathbf{3840 \text{ kN}}$$



Obr. 3.42 Dostředný tlak

7. omezení únosnosti tlaččeného prvku

$$e_0 = \max\left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm}\right) = \max\left(\frac{600}{30}; 20 \text{ mm}\right) = \mathbf{20 \text{ mm}}$$

$$\arctg(e_0) = \arctg(20) = \mathbf{87,14^\circ}$$

Tab. 3.9 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle CNR-DT 203/2006 [3]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rd} [kNm] | N_{Rd} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 55,54 | 258,25 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 239,50 | 0,252 | 60,35 | 239,50 |
| | 0,025 | 0,045 | 0,0004 | 0,1683 | 0,3386 | 26,88 | 0,292 | 239,50 | 0,252 | 68,19 | 212,62 |
| | 0,050 | 0,090 | 0,0008 | 0,3287 | 0,3453 | 104,99 | 0,283 | 239,50 | 0,252 | 90,04 | 134,51 |
| | 0,075 | 0,136 | 0,0012 | 0,4758 | 0,3539 | 227,99 | 0,274 | 239,50 | 0,252 | 122,71 | 11,51 |
| | 0,100 | 0,181 | 0,0017 | 0,6023 | 0,3654 | 384,80 | 0,264 | 239,50 | 0,252 | 161,76 | -145,30 |
| | 0,125 | 0,226 | 0,0022 | 0,6981 | 0,3817 | 557,44 | 0,252 | 239,50 | 0,252 | 201,04 | -317,94 |
| | 0,150 | 0,271 | 0,0028 | 0,7631 | 0,3999 | 731,23 | 0,240 | 239,50 | 0,252 | 235,94 | -491,73 |
| x_{bal} | 0,175 | 0,316 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 905,03 | 0,227 | 239,50 | 0,252 | 266,10 | -665,53 |
| | 0,175 | 0,316 | 0,0076 | 302,40 | 0,4160 | 905,03 | 0,227 | 239,50 | 0,252 | 266,10 | -665,53 |
| tlakové porušení | 0,204 | 0,369 | 0,0060 | 239,37 | 0,4160 | 1055,40 | 0,215 | 189,58 | 0,252 | 274,96 | -865,82 |
| | 0,233 | 0,422 | 0,0048 | 192,06 | 0,4160 | 1205,77 | 0,203 | 152,11 | 0,252 | 283,33 | -1053,67 |
| | 0,262 | 0,474 | 0,0039 | 155,24 | 0,4160 | 1356,15 | 0,191 | 122,95 | 0,252 | 290,17 | -1233,20 |
| | 0,291 | 0,527 | 0,0031 | 125,77 | 0,4160 | 1506,52 | 0,179 | 99,61 | 0,252 | 294,84 | -1406,91 |
| | 0,320 | 0,579 | 0,0025 | 101,65 | 0,4160 | 1656,90 | 0,167 | 80,50 | 0,252 | 296,94 | -1576,39 |
| | 0,349 | 0,632 | 0,0020 | 81,54 | 0,4160 | 1807,27 | 0,155 | 64,58 | 0,252 | 296,22 | -1742,69 |
| | 0,378 | 0,685 | 0,0016 | 64,52 | 0,4160 | 1957,64 | 0,143 | 51,10 | 0,252 | 292,48 | -1906,54 |
| | 0,407 | 0,737 | 0,0012 | 49,93 | 0,4160 | 2108,02 | 0,131 | 39,55 | 0,252 | 285,59 | -2068,47 |
| | 0,436 | 0,790 | 0,0009 | 37,29 | 0,4160 | 2258,39 | 0,119 | 29,53 | 0,252 | 275,47 | -2228,86 |
| | 0,465 | 0,842 | 0,0007 | 26,22 | 0,4160 | 2408,76 | 0,107 | 20,77 | 0,252 | 262,02 | -2388,00 |
| | 0,494 | 0,895 | 0,0004 | 16,45 | 0,4160 | 2559,14 | 0,095 | 13,03 | 0,252 | 245,21 | -2546,11 |
| | 0,523 | 0,947 | 0,0002 | 7,77 | 0,4160 | 2709,51 | 0,082 | 6,15 | 0,252 | 224,98 | -2703,36 |
| | 0,552 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 2859,89 | 0,070 | 0,00 | 0,252 | 201,30 | -2859,89 |
| | 0,568 | 1,029 | -0,0001 | -3,94 | 0,4160 | 2942,78 | 0,064 | 0,00 | 0,252 | 187,55 | -2942,78 |
| | 0,584 | 1,058 | -0,0002 | -7,67 | 0,4160 | 3025,68 | 0,057 | 0,00 | 0,252 | 172,69 | -3025,68 |
| | 0,600 | 1,087 | -0,0003 | -11,20 | 0,4160 | 3108,57 | 0,050 | 0,00 | 0,252 | 156,73 | -3108,57 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3840,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_f [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rd} [kNm] | N_{Rd} [kN] |

3.5.5.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro vrchní vrstvu výztuže

Tab. 3.10 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle CNR-DT 203/2006 [3]

| | x [m] | ξ [-] | ε _c [-] | α [-] | ω [-] | N _c [kN] | z _c [m] | N _r [kN] | z _r [m] | M _{Rd} [kNm] | N _{Rd} [kN] |
|------------------|----------------|-------|--------------------|------------------------|--------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 55,54 | 258,25 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 18,75 | 0,257 | -4,82 | 18,75 |
| | 0,025 | 0,045 | 0,0004 | 0,1683 | 0,3386 | 27,12 | 0,291 | 18,75 | 0,257 | -12,72 | -8,37 |
| | 0,050 | 0,090 | 0,0008 | 0,3287 | 0,3453 | 105,94 | 0,283 | 18,75 | 0,257 | -34,76 | -87,19 |
| | 0,076 | 0,136 | 0,0012 | 0,4758 | 0,3539 | 230,06 | 0,273 | 18,75 | 0,257 | -67,69 | -211,31 |
| | 0,101 | 0,181 | 0,0017 | 0,6023 | 0,3654 | 388,29 | 0,263 | 18,75 | 0,257 | -107,01 | -369,54 |
| | 0,126 | 0,226 | 0,0022 | 0,6981 | 0,3817 | 562,49 | 0,252 | 18,75 | 0,257 | -146,53 | -543,74 |
| | 0,151 | 0,271 | 0,0028 | 0,7631 | 0,3999 | 737,86 | 0,240 | 18,75 | 0,257 | -181,59 | -719,11 |
| x _{bal} | 0,176 | 0,316 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 913,22 | 0,227 | 18,75 | 0,257 | -211,83 | -894,48 |
| | 0,176 | 0,316 | 0,0076 | 302,40 | 0,4160 | 913,22 | 0,227 | 18,75 | 0,257 | -211,83 | -894,48 |
| tlakové porušení | 0,206 | 0,369 | 0,0060 | 239,37 | 0,4160 | 1064,96 | 0,214 | 14,84 | 0,257 | -232,24 | -1050,12 |
| | 0,235 | 0,422 | 0,0048 | 192,06 | 0,4160 | 1216,70 | 0,202 | 11,91 | 0,257 | -249,22 | -1204,79 |
| | 0,264 | 0,474 | 0,0039 | 155,24 | 0,4160 | 1368,43 | 0,190 | 9,62 | 0,257 | -262,66 | -1358,81 |
| | 0,293 | 0,527 | 0,0031 | 125,77 | 0,4160 | 1520,17 | 0,178 | 7,80 | 0,257 | -272,52 | -1512,37 |
| | 0,323 | 0,579 | 0,0025 | 101,65 | 0,4160 | 1671,90 | 0,166 | 6,30 | 0,257 | -278,77 | -1665,60 |
| | 0,352 | 0,632 | 0,0020 | 81,54 | 0,4160 | 1823,64 | 0,154 | 5,06 | 0,257 | -281,38 | -1818,58 |
| | 0,381 | 0,685 | 0,0016 | 64,52 | 0,4160 | 1975,38 | 0,141 | 4,00 | 0,257 | -280,35 | -1971,38 |
| | 0,411 | 0,737 | 0,0012 | 49,93 | 0,4160 | 2127,11 | 0,129 | 3,10 | 0,257 | -275,66 | -2124,02 |
| | 0,440 | 0,790 | 0,0009 | 37,29 | 0,4160 | 2278,85 | 0,117 | 2,31 | 0,257 | -267,30 | -2276,54 |
| | 0,469 | 0,842 | 0,0007 | 26,22 | 0,4160 | 2430,58 | 0,105 | 1,63 | 0,257 | -255,27 | -2428,96 |
| | 0,498 | 0,895 | 0,0004 | 16,45 | 0,4160 | 2582,32 | 0,093 | 1,02 | 0,257 | -239,57 | -2581,30 |
| | 0,528 | 0,947 | 0,0002 | 7,77 | 0,4160 | 2734,05 | 0,080 | 0,48 | 0,257 | -220,19 | -2733,57 |
| | 0,557 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 2885,79 | 0,068 | 0,00 | 0,257 | -197,12 | -2885,79 |
| | 0,573 | 1,029 | -0,0001 | -3,91 | 0,4160 | 2968,69 | 0,062 | 0,00 | 0,257 | -183,02 | -2968,69 |
| | 0,589 | 1,057 | -0,0002 | -7,61 | 0,4160 | 3051,58 | 0,055 | 0,00 | 0,257 | -167,82 | -3051,58 |
| | 0,600 | 1,077 | -0,0003 | -10,03 | 0,4160 | 3108,57 | 0,050 | 0,00 | 0,257 | -156,73 | -3108,57 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3840,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ε _r [-] | f _{frp} [MPa] | ω [-] | N _c [kN] | z _c [m] | N _r [kN] | z _r [m] | M _{Rd} [kNm] | N _{Rd} [kN] |

3.5.5.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže

1. maximální dovolené napětí ve výztuži při dlouhodobém zatížení

$$\gamma_c = 1,0$$

$$\gamma_f = 1,0$$

$$\eta_a = 0,8$$

$$\eta_1 = 0,3$$

$$f_{fd,lim} = \eta_1 \eta_a \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = 0,3 \times 0,8 \frac{630}{1,0} = 151,2 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fd,lim} = \frac{f_{fd,lim}}{E_f} = \frac{151,2}{40 \times 10^3} = 0,00378$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

2. oblast tahového porušení

$$N_c = \alpha f_{ck} x b$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d-x} \varepsilon_{fd,lim}$$

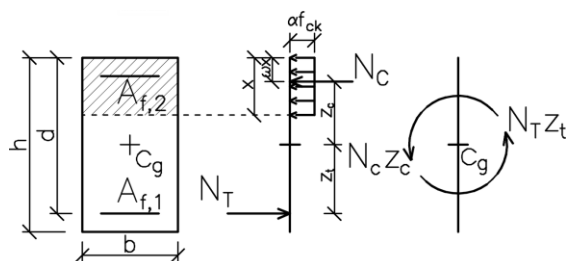
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_{c2})} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$N_T = A_f \varepsilon_{fd,lim} E_f$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.43 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$N_c = \alpha f_{ck} x b$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

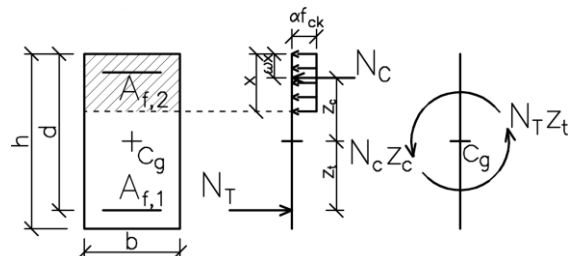
$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}$$

$$N_T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.44 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_{Rk} = N_c z_c + N_T z_t$$

$$N_{Rk} = N_c + N_T$$

5. dostředný tah

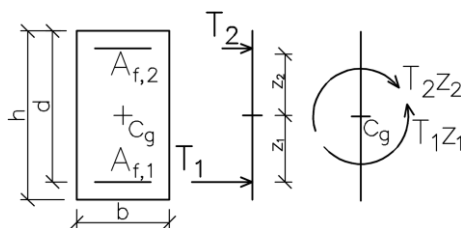
$$N_c = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = A_{f,1} \varepsilon_{fd,lim} E_f = 7,92 \times 10^{-4} \times 0,00378 \times 40 \times 10^6 = 119,75 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = A_{f,2} \varepsilon_{fd,lim} E_f = 0,62 \times 10^{-4} \times 0,00378 \times 40 \times 10^6 = 9,37 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = N_{T,1} \times z_1 - N_{T,2} \times z_2 = 119,75 \times 0,252 - 9,37 \times 0,257 = 27,77 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = N_{T,1} + N_{T,2} = 119,75 + 9,37 = 129,12 \text{ kN}$$



Obr. 3.45 Dostředný tah

6. dostředný tlak

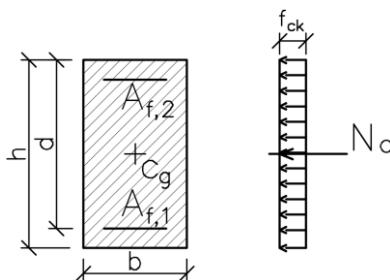
$$N_c = b h f_{ck} = -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 10^3 = -5760 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = N_c = -5760 \text{ kN}$$



Obr. 3.46 Dostředný tlak

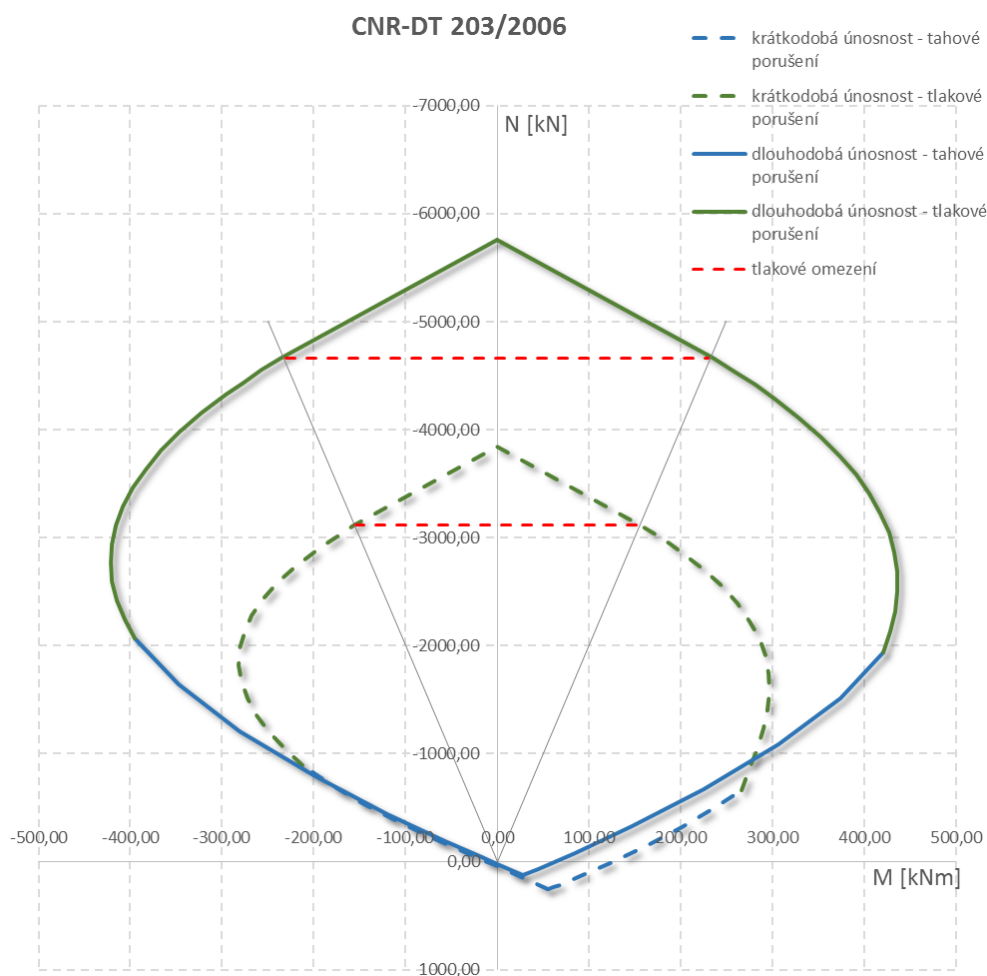
Tab. 3.11 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle CNR-DT [3]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 27,77 | 129,12 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 119,75 | 0,252 | 30,18 | 119,75 |
| | 0,038 | 0,069 | 0,0003 | 0,1329 | 0,3374 | 48,37 | 0,287 | 119,75 | 0,252 | 44,07 | 71,38 |
| | 0,076 | 0,137 | 0,0006 | 0,2708 | 0,3426 | 197,09 | 0,274 | 119,75 | 0,252 | 84,18 | -77,34 |
| | 0,114 | 0,206 | 0,0010 | 0,4103 | 0,3496 | 447,99 | 0,260 | 119,75 | 0,252 | 146,76 | -328,24 |
| | 0,152 | 0,275 | 0,0014 | 0,5451 | 0,3595 | 793,52 | 0,245 | 119,75 | 0,252 | 224,98 | -673,77 |
| | 0,190 | 0,343 | 0,0020 | 0,6628 | 0,3743 | 1206,13 | 0,229 | 119,75 | 0,252 | 306,44 | -1086,38 |
| | 0,227 | 0,412 | 0,0026 | 0,7484 | 0,3953 | 1634,27 | 0,210 | 119,75 | 0,252 | 373,49 | -1514,52 |
| x_{bal} | 0,265 | 0,481 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 2062,42 | 0,190 | 119,75 | 0,252 | 421,23 | -1942,67 |
| | 0,265 | 0,481 | 0,0038 | 151,20 | 0,4160 | 2062,42 | 0,190 | 119,75 | 0,252 | 421,23 | -1942,67 |
| tlakové porušení | 0,287 | 0,521 | 0,0032 | 128,86 | 0,4160 | 2233,76 | 0,180 | 102,06 | 0,252 | 428,77 | -2131,70 |
| | 0,309 | 0,561 | 0,0027 | 109,71 | 0,4160 | 2405,10 | 0,171 | 86,89 | 0,252 | 433,81 | -2318,21 |
| | 0,332 | 0,601 | 0,0023 | 93,10 | 0,4160 | 2576,44 | 0,162 | 73,74 | 0,252 | 436,21 | -2502,70 |
| | 0,354 | 0,641 | 0,0020 | 78,57 | 0,4160 | 2747,77 | 0,153 | 62,23 | 0,252 | 435,88 | -2685,55 |
| | 0,376 | 0,680 | 0,0016 | 65,74 | 0,4160 | 2919,11 | 0,144 | 52,07 | 0,252 | 432,76 | -2867,05 |
| | 0,398 | 0,720 | 0,0014 | 54,33 | 0,4160 | 3090,45 | 0,135 | 43,03 | 0,252 | 426,77 | -3047,42 |
| | 0,420 | 0,760 | 0,0011 | 44,12 | 0,4160 | 3261,79 | 0,125 | 34,95 | 0,252 | 417,88 | -3226,85 |
| | 0,442 | 0,800 | 0,0009 | 34,94 | 0,4160 | 3433,13 | 0,116 | 27,67 | 0,252 | 406,04 | -3405,46 |
| | 0,464 | 0,840 | 0,0007 | 26,62 | 0,4160 | 3604,47 | 0,107 | 21,08 | 0,252 | 391,24 | -3583,39 |
| | 0,486 | 0,880 | 0,0005 | 19,06 | 0,4160 | 3775,81 | 0,098 | 15,09 | 0,252 | 373,45 | -3760,72 |
| | 0,508 | 0,920 | 0,0003 | 12,15 | 0,4160 | 3947,15 | 0,089 | 9,63 | 0,252 | 352,65 | -3937,52 |
| | 0,530 | 0,960 | 0,0001 | 5,82 | 0,4160 | 4118,49 | 0,080 | 4,61 | 0,252 | 328,82 | -4113,88 |
| | 0,552 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 4289,83 | 0,070 | 0,00 | 0,252 | 301,95 | -4289,83 |
| | 0,568 | 1,029 | -0,0001 | -3,94 | 0,4160 | 4414,17 | 0,064 | 0,00 | 0,252 | 281,32 | -4414,17 |
| | 0,584 | 1,058 | -0,0002 | -7,67 | 0,4160 | 4538,51 | 0,057 | 0,00 | 0,252 | 259,04 | -4538,51 |
| | 0,600 | 1,087 | -0,0003 | -11,20 | 0,4160 | 4662,86 | 0,050 | 0,00 | 0,252 | 235,10 | -4662,86 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_f [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |

3.5.5.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže

Tab. 3.12 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle CNR-DT [3]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 27,77 | 129,12 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 9,37 | 0,257 | -2,41 | 9,37 |
| | 0,038 | 0,069 | 0,0003 | 0,1329 | 0,3374 | 48,81 | 0,287 | 9,37 | 0,257 | -16,42 | -39,44 |
| | 0,077 | 0,137 | 0,0006 | 0,2708 | 0,3426 | 198,88 | 0,274 | 9,37 | 0,257 | -56,86 | -189,50 |
| | 0,115 | 0,206 | 0,0010 | 0,4103 | 0,3496 | 452,04 | 0,260 | 9,37 | 0,257 | -119,88 | -442,67 |
| | 0,153 | 0,275 | 0,0014 | 0,5451 | 0,3595 | 800,71 | 0,245 | 9,37 | 0,257 | -198,58 | -791,34 |
| | 0,191 | 0,343 | 0,0020 | 0,6628 | 0,3743 | 1217,05 | 0,228 | 9,37 | 0,257 | -280,39 | -1207,68 |
| | 0,230 | 0,412 | 0,0026 | 0,7484 | 0,3953 | 1649,07 | 0,209 | 9,37 | 0,257 | -347,49 | -1639,70 |
| x_{bal} | 0,268 | 0,481 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 2081,10 | 0,189 | 9,37 | 0,257 | -394,92 | -2071,72 |
| | 0,268 | 0,481 | 0,0038 | 151,20 | 0,4160 | 2081,10 | 0,189 | 9,37 | 0,257 | -394,92 | -2071,72 |
| tlakové porušení | 0,290 | 0,521 | 0,0032 | 128,86 | 0,4160 | 2253,99 | 0,179 | 7,99 | 0,257 | -406,32 | -2246,00 |
| | 0,312 | 0,561 | 0,0027 | 109,71 | 0,4160 | 2426,88 | 0,170 | 6,80 | 0,257 | -414,56 | -2420,08 |
| | 0,335 | 0,601 | 0,0023 | 93,10 | 0,4160 | 2599,77 | 0,161 | 5,77 | 0,257 | -419,65 | -2594,00 |
| | 0,357 | 0,641 | 0,0020 | 78,57 | 0,4160 | 2772,66 | 0,152 | 4,87 | 0,257 | -421,57 | -2767,79 |
| | 0,379 | 0,680 | 0,0016 | 65,74 | 0,4160 | 2945,56 | 0,142 | 4,08 | 0,257 | -420,31 | -2941,48 |
| | 0,401 | 0,720 | 0,0014 | 54,33 | 0,4160 | 3118,45 | 0,133 | 3,37 | 0,257 | -415,88 | -3115,08 |
| | 0,424 | 0,760 | 0,0011 | 44,12 | 0,4160 | 3291,34 | 0,124 | 2,74 | 0,257 | -408,27 | -3288,60 |
| | 0,446 | 0,800 | 0,0009 | 34,94 | 0,4160 | 3464,23 | 0,115 | 2,17 | 0,257 | -397,48 | -3462,06 |
| | 0,468 | 0,840 | 0,0007 | 26,62 | 0,4160 | 3637,12 | 0,105 | 1,65 | 0,257 | -383,50 | -3635,47 |
| | 0,490 | 0,880 | 0,0005 | 19,06 | 0,4160 | 3810,01 | 0,096 | 1,18 | 0,257 | -366,33 | -3808,83 |
| | 0,513 | 0,920 | 0,0003 | 12,15 | 0,4160 | 3982,90 | 0,087 | 0,75 | 0,257 | -345,97 | -3982,15 |
| | 0,535 | 0,960 | 0,0001 | 5,82 | 0,4160 | 4155,79 | 0,078 | 0,36 | 0,257 | -322,42 | -4155,43 |
| | 0,557 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 4328,69 | 0,068 | 0,00 | 0,257 | -295,68 | -4328,69 |
| | 0,571 | 1,026 | -0,0001 | -3,51 | 0,4160 | 4440,08 | 0,062 | 0,00 | 0,257 | -276,81 | -4440,08 |
| | 0,586 | 1,051 | -0,0002 | -6,85 | 0,4160 | 4551,47 | 0,056 | 0,00 | 0,257 | -256,62 | -4551,47 |
| | 0,600 | 1,077 | -0,0003 | -10,03 | 0,4160 | 4662,86 | 0,050 | 0,00 | 0,257 | -235,10 | -4662,86 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_r [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |



Obr. 3.47 Interakční diagram průřezu dle CNR-DT 203/2006 [3]

3.5.6 Interakční diagram dle fib Bulletin No. 40 [4]

3.5.6.1 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro spodní vrstvu výztuže

1. součinitele bezpečnosti betonu a FRP výztuže

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\gamma_f = 1,25$$

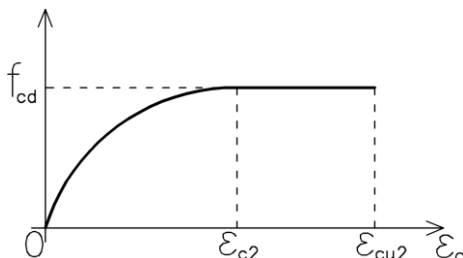
$$f_{fd} = \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{630}{1,25} = 504 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fd} = \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f} = \frac{0,01575}{1,25} = 0,0126$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5} = \mathbf{20 \text{ MPa}}$$

2. oblast tahového porušení

$$N_c = \alpha f_{cd} x b$$



Obr. 3.48 parabolicko-rektangulární pracovní diagram betonu v tlaku

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{c2}^2} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d-x} \varepsilon_{fd}$$

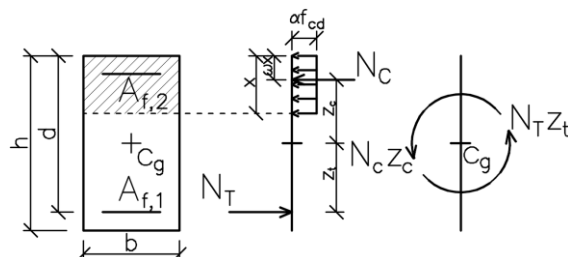
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{c2}^2 - \varepsilon_c^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$N_T = A_f \varepsilon_{fd} E_f$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.49 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$N_c = \alpha f_{cd} x b$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

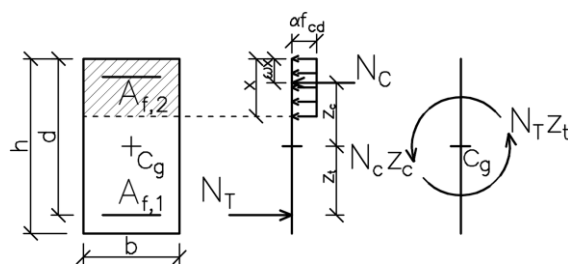
$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}$$

$$N_T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.50 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_{Rd} = N_c z_c + N_T z_t$$

$$N_{Rd} = N_c + N_T$$

5. dostředný tah

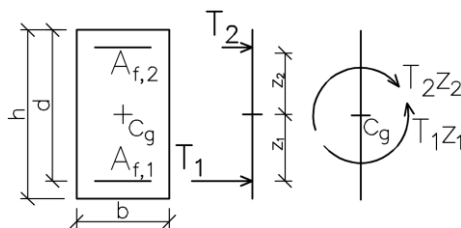
$$N_c = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = A_{f,1} f_{fd} = 7,92 \times 10^{-4} \times 504 \times 10^3 = 399,17 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = A_{f,2} f_{fd} = 0,62 \times 10^{-4} \times 504 \times 10^3 = 31,25 \text{ kN}$$

$$M_{Rd} = N_{T,1} \times z_1 - N_{T,2} \times z_2 = 399,17 \times 0,252 - 31,25 \times 0,257 = 92,56 \text{ kNm}$$

$$N_{Rd} = N_{T,1} + N_{T,2} = 399,17 + 31,25 = 430,42 \text{ kN}$$



Obr. 3.51 Dostředný tah

6. dostředný tlak

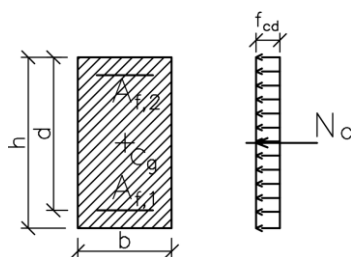
$$N_c = bh f_{cd} = -0,32 \times 0,6 \times 20 \times 10^3 = -\mathbf{3840 \text{ kN}}$$

$$N_{T,1} = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$N_{T,2} = \mathbf{0 \text{ kN}}$$

$$M_{Rd} = \mathbf{0 \text{ kNm}}$$

$$N_{Rd} = N_c = -\mathbf{3840 \text{ kN}}$$



Obr. 3.52 Dostředný tlak

7. omezení únosnosti tlačенého prvku

$$e_0 = \max\left(\frac{h}{30}; 20 \text{ mm}\right) = \max\left(\frac{600}{30}; 20 \text{ mm}\right) = \mathbf{20 \text{ mm}}$$

$$\arctg(e_0) = \arctg(20) = \mathbf{87,14^\circ}$$

Tab. 3.13 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle fib Bulletin No. 40 [4]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rd} [kNm] | N_{Rd} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 92,56 | 430,42 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 399,17 | 0,252 | 100,59 | 399,17 |
| | 0,017 | 0,031 | 0,0004 | 0,1883 | 0,3393 | 20,66 | 0,294 | 399,17 | 0,252 | 106,67 | 378,51 |
| | 0,034 | 0,062 | 0,0008 | 0,3592 | 0,3468 | 78,82 | 0,288 | 399,17 | 0,252 | 123,30 | 320,35 |
| | 0,051 | 0,093 | 0,0013 | 0,5076 | 0,3563 | 167,08 | 0,282 | 399,17 | 0,252 | 147,65 | 232,09 |
| | 0,069 | 0,124 | 0,0018 | 0,6274 | 0,3687 | 275,35 | 0,275 | 399,17 | 0,252 | 176,24 | 123,81 |
| | 0,086 | 0,155 | 0,0023 | 0,7122 | 0,3852 | 390,68 | 0,267 | 399,17 | 0,252 | 204,90 | 8,49 |
| | 0,103 | 0,186 | 0,0029 | 0,7690 | 0,4018 | 506,20 | 0,259 | 399,17 | 0,252 | 231,53 | -107,03 |
| | 0,120 | 0,217 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 621,71 | 0,250 | 399,17 | 0,252 | 256,07 | -222,55 |
| | 0,120 | 0,217 | 0,0126 | 504,00 | 0,4160 | 621,71 | 0,250 | 399,17 | 0,252 | 256,07 | -222,55 |
| x_{bal} | | | | | | | | | | | |
| tlakové porušení | 0,153 | 0,278 | 0,0091 | 364,34 | 0,4160 | 793,88 | 0,236 | 288,56 | 0,252 | 260,28 | -505,33 |
| | 0,186 | 0,338 | 0,0069 | 274,46 | 0,4160 | 966,05 | 0,222 | 217,37 | 0,252 | 269,66 | -748,68 |
| | 0,220 | 0,398 | 0,0053 | 211,76 | 0,4160 | 1138,22 | 0,209 | 167,72 | 0,252 | 279,71 | -970,50 |
| | 0,253 | 0,458 | 0,0041 | 165,55 | 0,4160 | 1310,38 | 0,195 | 131,11 | 0,252 | 288,29 | -1179,27 |
| | 0,286 | 0,518 | 0,0033 | 130,06 | 0,4160 | 1482,55 | 0,181 | 103,01 | 0,252 | 294,26 | -1379,54 |
| | 0,319 | 0,579 | 0,0025 | 101,97 | 0,4160 | 1654,72 | 0,167 | 80,76 | 0,252 | 296,93 | -1573,96 |
| | 0,353 | 0,639 | 0,0020 | 79,16 | 0,4160 | 1826,88 | 0,153 | 62,70 | 0,252 | 295,90 | -1764,19 |
| | 0,386 | 0,699 | 0,0015 | 60,29 | 0,4160 | 1999,05 | 0,140 | 47,75 | 0,252 | 290,90 | -1951,30 |
| | 0,419 | 0,759 | 0,0011 | 44,41 | 0,4160 | 2171,22 | 0,126 | 35,17 | 0,252 | 281,74 | -2136,05 |
| | 0,452 | 0,819 | 0,0008 | 30,86 | 0,4160 | 2343,38 | 0,112 | 24,44 | 0,252 | 268,28 | -2318,95 |
| | 0,486 | 0,880 | 0,0005 | 19,16 | 0,4160 | 2515,55 | 0,098 | 15,18 | 0,252 | 250,43 | -2500,37 |
| | 0,519 | 0,940 | 0,0002 | 8,97 | 0,4160 | 2687,72 | 0,084 | 7,10 | 0,252 | 228,12 | -2680,62 |
| | 0,552 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 2859,89 | 0,070 | 0,00 | 0,252 | 201,30 | -2859,89 |
| | 0,568 | 1,029 | -0,0001 | -3,94 | 0,4160 | 2942,78 | 0,064 | 0,00 | 0,252 | 187,55 | -2942,78 |
| | 0,584 | 1,058 | -0,0002 | -7,67 | 0,4160 | 3025,68 | 0,057 | 0,00 | 0,252 | 172,69 | -3025,68 |
| | 0,600 | 1,087 | -0,0003 | -11,20 | 0,4160 | 3108,57 | 0,050 | 0,00 | 0,252 | 156,73 | -3108,57 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3840,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_f [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rd} [kNm] | N_{Rd} [kN] |

3.5.6.2 Interakční diagram krátkodobé únosnosti pro vrchní vrstvu výztuže

Tab. 3.14 Výpočet bodů ID krátkodobé únosnosti dle fib Bulletin No. 40 [4]

| | x [m] | ξ [-] | ε _c [-] | α [-] | ω [-] | N _c [kN] | z _c [m] | N _t [kN] | z _t [m] | M _{Rd} [kNm] | N _{Rd} [kN] |
|------------------|----------------|-------|--------------------|------------------------|--------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 92,56 | 430,42 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 31,25 | 0,257 | -8,03 | 31,25 |
| | 0,017 | 0,031 | 0,0004 | 0,1883 | 0,3393 | 20,85 | 0,294 | 31,25 | 0,257 | -14,16 | 10,40 |
| | 0,035 | 0,062 | 0,0008 | 0,3592 | 0,3468 | 79,53 | 0,288 | 31,25 | 0,257 | -30,94 | -48,28 |
| | 0,052 | 0,093 | 0,0013 | 0,5076 | 0,3563 | 168,59 | 0,282 | 31,25 | 0,257 | -55,49 | -137,34 |
| | 0,069 | 0,124 | 0,0018 | 0,6274 | 0,3687 | 277,85 | 0,274 | 31,25 | 0,257 | -84,30 | -246,60 |
| | 0,086 | 0,155 | 0,0023 | 0,7122 | 0,3852 | 394,21 | 0,267 | 31,25 | 0,257 | -113,16 | -362,97 |
| | 0,104 | 0,186 | 0,0029 | 0,7690 | 0,4018 | 510,78 | 0,258 | 31,25 | 0,257 | -139,96 | -479,53 |
| | 0,121 | 0,217 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 627,35 | 0,250 | 31,25 | 0,257 | -164,64 | -596,10 |
| x _{bal} | 0,121 | 0,217 | 0,0126 | 504,00 | 0,4160 | 627,35 | 0,250 | 31,25 | 0,257 | -164,64 | -596,10 |
| tlakové porušení | 0,155 | 0,278 | 0,0091 | 364,34 | 0,4160 | 801,07 | 0,236 | 22,59 | 0,257 | -194,61 | -778,48 |
| | 0,188 | 0,338 | 0,0069 | 274,46 | 0,4160 | 974,80 | 0,222 | 17,02 | 0,257 | -220,52 | -957,78 |
| | 0,222 | 0,398 | 0,0053 | 211,76 | 0,4160 | 1148,53 | 0,208 | 13,13 | 0,257 | -242,02 | -1135,40 |
| | 0,255 | 0,458 | 0,0041 | 165,55 | 0,4160 | 1322,25 | 0,194 | 10,26 | 0,257 | -258,94 | -1311,99 |
| | 0,289 | 0,518 | 0,0033 | 130,06 | 0,4160 | 1495,98 | 0,180 | 8,06 | 0,257 | -271,19 | -1487,91 |
| | 0,322 | 0,579 | 0,0025 | 101,97 | 0,4160 | 1669,70 | 0,166 | 6,32 | 0,257 | -278,70 | -1663,38 |
| | 0,356 | 0,639 | 0,0020 | 79,16 | 0,4160 | 1843,43 | 0,152 | 4,91 | 0,257 | -281,45 | -1838,52 |
| | 0,389 | 0,699 | 0,0015 | 60,29 | 0,4160 | 2017,16 | 0,138 | 3,74 | 0,257 | -279,42 | -2013,42 |
| | 0,423 | 0,759 | 0,0011 | 44,41 | 0,4160 | 2190,88 | 0,124 | 2,75 | 0,257 | -272,59 | -2188,13 |
| | 0,456 | 0,819 | 0,0008 | 30,86 | 0,4160 | 2364,61 | 0,110 | 1,91 | 0,257 | -260,96 | -2362,70 |
| | 0,490 | 0,880 | 0,0005 | 19,16 | 0,4160 | 2538,34 | 0,096 | 1,19 | 0,257 | -244,50 | -2537,15 |
| | 0,523 | 0,940 | 0,0002 | 8,97 | 0,4160 | 2712,06 | 0,082 | 0,56 | 0,257 | -223,22 | -2711,51 |
| | 0,557 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 2885,79 | 0,068 | 0,00 | 0,257 | -197,12 | -2885,79 |
| | 0,573 | 1,029 | -0,0001 | -3,91 | 0,4160 | 2968,69 | 0,062 | 0,00 | 0,257 | -183,02 | -2968,69 |
| | 0,589 | 1,057 | -0,0002 | -7,61 | 0,4160 | 3051,58 | 0,055 | 0,00 | 0,257 | -167,82 | -3051,58 |
| | 0,600 | 1,077 | -0,0003 | -10,03 | 0,4160 | 3108,57 | 0,050 | 0,00 | 0,257 | -156,73 | -3108,57 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -3840,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ε _t [-] | f _{frp} [MPa] | ω [-] | N _c [kN] | z _c [m] | N _t [kN] | z _t [m] | M _{Rd} [kNm] | N _{Rd} [kN] |

3.5.6.3 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro spodní vrstvu výztuže

1. maximální dovolené napětí ve výztuži při dlouhodobém zatížení

$$\gamma_c = 1,0$$

$$\gamma_f = 1,25$$

$$\eta_{env,t} = \frac{1}{\left(\frac{100-R_{10}}{100}\right)^{n+2}} = \frac{1}{\left(\frac{100-25}{100}\right)^{2,2+2}} = 3,35$$

$$n = n_{mo} + n_T + n_{SL} = -1 + 0,5 + 2,7 = 2,2$$

$$R_{10} = 25\%$$

$$f_{fd,lim} = \frac{f_{fk}}{\eta_{env,t} \gamma_f} = \frac{630}{3,35 \times 1,25} = 150,45 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{fd,lim} = \frac{f_{fd,lim}}{E_f} = \frac{150,45}{40 \times 10^3} = 0,00376$$

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

2. oblast tahového porušení

$$N_c = \alpha f_{ck} x b$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} - \frac{\varepsilon_c^2}{3\varepsilon_{c2}} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_c} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$\varepsilon_c = \frac{x}{d-x} \varepsilon_{fd,lim}$$

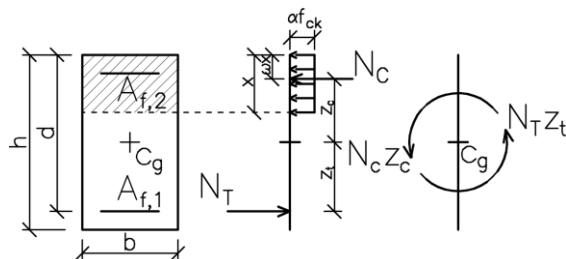
$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

$$\omega = \frac{4\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c}{4(3\varepsilon_{c2} - \varepsilon_c)} \quad \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_c^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_c(3\varepsilon_c - \varepsilon_{c2})} \quad \text{pro } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

$$N_T = A_f \varepsilon_{fd,lim} E_f$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.53 Oblast tahového porušení

3. oblast tlakového porušení

$$N_c = \alpha f_{ck} x b$$

$$\alpha = 1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\varepsilon_{cu2}}$$

$$z_c = \frac{h}{2} - \omega x$$

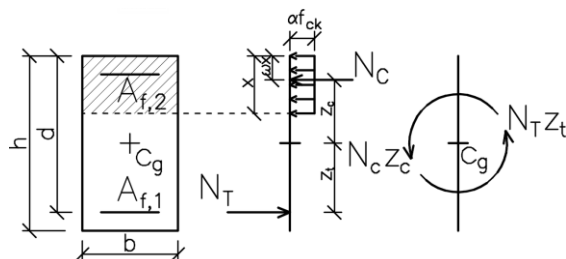
$$\omega = 1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}$$

$$N_T = A_f f_f$$

$$f_f = \varepsilon_f E_f$$

$$\varepsilon_f = \frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu}$$

$$z_t = d - \frac{h}{2}$$



Obr. 3.54 Oblast tlakového porušení

4. výpočet únosnosti průřezu

$$M_{Rk} = N_C z_c + N_T z_t$$

$$N_{Rk} = N_C + N_T$$

5. dostředný tah

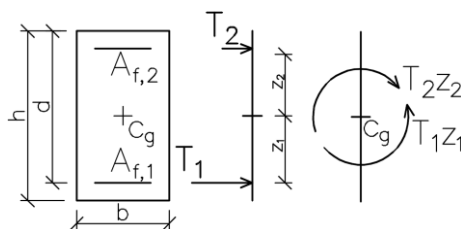
$$N_C = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = A_{f,1} f_{fd,lim} = 7,92 \times 10^{-4} \times 150,45 \times 10^3 = 119,15 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = A_{f,2} f_{fd,lim} = 0,62 \times 10^{-4} \times 150,45 \times 10^3 = 9,33 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = N_{T,1} \times z_1 - N_{T,2} \times z_2 = 119,15 \times 0,252 - 9,33 \times 0,257 = 27,63 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = N_{T,1} + N_{T,2} = 119,15 + 9,33 = 128,48 \text{ kN}$$



Obr. 3.55 Dostředný tah

6. dostředný tlak

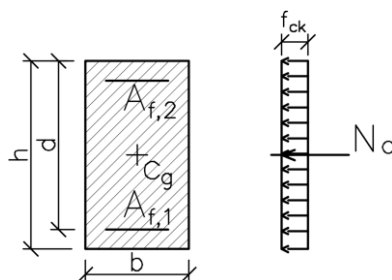
$$N_c = b h f_{ck} = -0,32 \times 0,6 \times 30 \times 10^3 = -5760 \text{ kN}$$

$$N_{T,1} = 0 \text{ kN}$$

$$N_{T,2} = 0 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = 0 \text{ kNm}$$

$$N_{Rk} = N_c = -5760 \text{ kN}$$



Obr. 3.56 Dostředný tlak

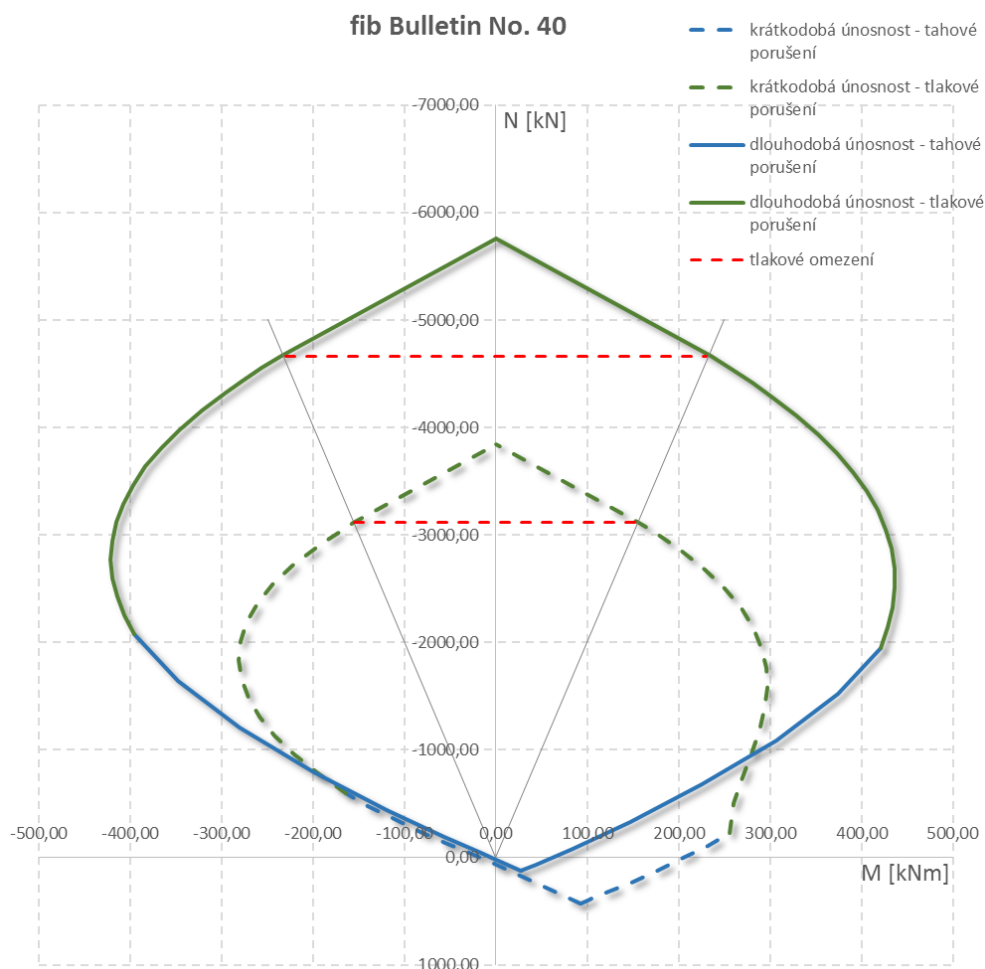
Tab. 3.15 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle fib Bulletin [4]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | | 27,63 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 119,15 | 0,252 | 30,03 | 119,15 |
| | 0,038 | 0,069 | 0,0003 | 0,1326 | 0,3374 | 48,39 | 0,287 | 119,15 | 0,252 | 43,92 | 70,76 |
| | 0,076 | 0,138 | 0,0006 | 0,2703 | 0,3426 | 197,25 | 0,274 | 119,15 | 0,252 | 84,07 | -78,10 |
| | 0,114 | 0,207 | 0,0010 | 0,4097 | 0,3496 | 448,52 | 0,260 | 119,15 | 0,252 | 146,70 | -329,37 |
| | 0,152 | 0,275 | 0,0014 | 0,5445 | 0,3594 | 794,80 | 0,245 | 119,15 | 0,252 | 225,04 | -675,65 |
| | 0,190 | 0,344 | 0,0020 | 0,6624 | 0,3742 | 1208,61 | 0,229 | 119,15 | 0,252 | 306,65 | -1089,45 |
| | 0,228 | 0,413 | 0,0026 | 0,7482 | 0,3953 | 1638,18 | 0,210 | 119,15 | 0,252 | 373,80 | -1519,03 |
| x_{bal} | 0,266 | 0,482 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 2067,76 | 0,189 | 119,15 | 0,252 | 421,50 | -1948,60 |
| | 0,266 | 0,482 | 0,0038 | 150,45 | 0,4160 | 2067,76 | 0,189 | 119,15 | 0,252 | 421,50 | -1948,60 |
| tlakové porušení | 0,288 | 0,522 | 0,0032 | 128,27 | 0,4160 | 2238,69 | 0,180 | 101,59 | 0,252 | 428,95 | -2137,10 |
| | 0,310 | 0,562 | 0,0027 | 109,24 | 0,4160 | 2409,62 | 0,171 | 86,52 | 0,252 | 433,91 | -2323,10 |
| | 0,332 | 0,602 | 0,0023 | 92,73 | 0,4160 | 2580,54 | 0,162 | 73,44 | 0,252 | 436,24 | -2507,10 |
| | 0,354 | 0,641 | 0,0020 | 78,27 | 0,4160 | 2751,47 | 0,153 | 61,99 | 0,252 | 435,85 | -2689,48 |
| | 0,376 | 0,681 | 0,0016 | 65,51 | 0,4160 | 2922,40 | 0,144 | 51,88 | 0,252 | 432,67 | -2870,52 |
| | 0,398 | 0,721 | 0,0014 | 54,15 | 0,4160 | 3093,33 | 0,134 | 42,89 | 0,252 | 426,64 | -3050,44 |
| | 0,420 | 0,761 | 0,0011 | 43,99 | 0,4160 | 3264,26 | 0,125 | 34,84 | 0,252 | 417,73 | -3229,42 |
| | 0,442 | 0,801 | 0,0009 | 34,83 | 0,4160 | 3435,19 | 0,116 | 27,59 | 0,252 | 405,88 | -3407,60 |
| | 0,464 | 0,841 | 0,0007 | 26,54 | 0,4160 | 3606,11 | 0,107 | 21,02 | 0,252 | 391,09 | -3585,09 |
| | 0,486 | 0,880 | 0,0005 | 19,01 | 0,4160 | 3777,04 | 0,098 | 15,05 | 0,252 | 373,31 | -3761,99 |
| | 0,508 | 0,920 | 0,0003 | 12,12 | 0,4160 | 3947,97 | 0,089 | 9,60 | 0,252 | 352,54 | -3938,37 |
| | 0,530 | 0,960 | 0,0001 | 5,81 | 0,4160 | 4118,90 | 0,080 | 4,60 | 0,252 | 328,76 | -4114,30 |
| | 0,552 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 4289,83 | 0,070 | 0,00 | 0,252 | 301,95 | -4289,83 |
| | 0,568 | 1,029 | -0,0001 | -3,94 | 0,4160 | 4414,17 | 0,064 | 0,00 | 0,252 | 281,32 | -4414,17 |
| | 0,584 | 1,058 | -0,0002 | -7,67 | 0,4160 | 4538,51 | 0,057 | 0,00 | 0,252 | 259,04 | -4538,51 |
| | 0,600 | 1,087 | -0,0003 | -11,20 | 0,4160 | 4662,86 | 0,050 | 0,00 | 0,252 | 235,10 | -4662,86 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | | 0,00 |
| | 0,600 | 1,087 | -0,0003 | -11,20 | 0,4160 | 4662,86 | 0,050 | 0,00 | 0,252 | 235,10 | -4662,86 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_f [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |

3.5.6.4 Interakční diagram pro zamezení creepového porušení pro horní vrstvu výztuže

Tab. 3.16 Výpočet bodů ID pro zamezení creepového porušení dle fib Bulletin [4]

| | x [m] | ξ [-] | ϵ_c [-] | α [-] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |
|------------------|----------------|-----------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|---------------|
| tahové porušení | dostředný tah | | | | | | | | | 27,63 | 128,48 |
| | 0,000 | 0,000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3333 | 0,00 | 0,300 | 9,33 | 0,257 | -2,40 | 9,33 |
| | 0,038 | 0,069 | 0,0003 | 0,1326 | 0,3374 | 48,83 | 0,287 | 9,33 | 0,257 | -16,42 | -39,51 |
| | 0,077 | 0,138 | 0,0006 | 0,2703 | 0,3426 | 199,04 | 0,274 | 9,33 | 0,257 | -56,88 | -189,71 |
| | 0,115 | 0,207 | 0,0010 | 0,4097 | 0,3496 | 452,58 | 0,260 | 9,33 | 0,257 | -119,97 | -443,26 |
| | 0,153 | 0,275 | 0,0014 | 0,5445 | 0,3594 | 802,00 | 0,245 | 9,33 | 0,257 | -198,78 | -792,67 |
| | 0,192 | 0,344 | 0,0020 | 0,6624 | 0,3742 | 1219,55 | 0,228 | 9,33 | 0,257 | -280,74 | -1210,23 |
| | 0,230 | 0,413 | 0,0026 | 0,7482 | 0,3953 | 1653,02 | 0,209 | 9,33 | 0,257 | -347,93 | -1643,69 |
| | 0,268 | 0,482 | 0,0035 | 0,8095 | 0,4160 | 2086,49 | 0,188 | 9,33 | 0,257 | -395,33 | -2077,16 |
| x_{bal} | 0,268 | 0,482 | 0,0038 | 150,45 | 0,4160 | 2086,49 | 0,188 | 9,33 | 0,257 | -395,33 | -2077,16 |
| tlakové porušení | 0,291 | 0,522 | 0,0032 | 128,27 | 0,4160 | 2258,97 | 0,179 | 7,95 | 0,257 | -406,60 | -2251,01 |
| | 0,313 | 0,562 | 0,0027 | 109,24 | 0,4160 | 2431,44 | 0,170 | 6,77 | 0,257 | -414,74 | -2424,67 |
| | 0,335 | 0,602 | 0,0023 | 92,73 | 0,4160 | 2603,92 | 0,161 | 5,75 | 0,257 | -419,73 | -2598,17 |
| | 0,357 | 0,641 | 0,0020 | 78,27 | 0,4160 | 2776,40 | 0,151 | 4,85 | 0,257 | -421,57 | -2771,54 |
| | 0,379 | 0,681 | 0,0016 | 65,51 | 0,4160 | 2948,87 | 0,142 | 4,06 | 0,257 | -420,26 | -2944,81 |
| | 0,402 | 0,721 | 0,0014 | 54,15 | 0,4160 | 3121,35 | 0,133 | 3,36 | 0,257 | -415,78 | -3117,99 |
| | 0,424 | 0,761 | 0,0011 | 43,99 | 0,4160 | 3293,83 | 0,124 | 2,73 | 0,257 | -408,14 | -3291,10 |
| | 0,446 | 0,801 | 0,0009 | 34,83 | 0,4160 | 3466,30 | 0,114 | 2,16 | 0,257 | -397,33 | -3464,14 |
| | 0,468 | 0,841 | 0,0007 | 26,54 | 0,4160 | 3638,78 | 0,105 | 1,65 | 0,257 | -383,35 | -3637,13 |
| | 0,490 | 0,880 | 0,0005 | 19,01 | 0,4160 | 3811,26 | 0,096 | 1,18 | 0,257 | -366,19 | -3810,08 |
| | 0,513 | 0,920 | 0,0003 | 12,12 | 0,4160 | 3983,73 | 0,087 | 0,75 | 0,257 | -345,86 | -3982,98 |
| | 0,535 | 0,960 | 0,0001 | 5,81 | 0,4160 | 4156,21 | 0,078 | 0,36 | 0,257 | -322,36 | -4155,85 |
| | 0,557 | 1,000 | 0,0000 | 0,00 | 0,4160 | 4328,69 | 0,068 | 0,00 | 0,257 | -295,68 | -4328,69 |
| | 0,571 | 1,026 | -0,0001 | -3,51 | 0,4160 | 4440,08 | 0,062 | 0,00 | 0,257 | -276,81 | -4440,08 |
| | 0,586 | 1,051 | -0,0002 | -6,85 | 0,4160 | 4551,47 | 0,056 | 0,00 | 0,257 | -256,62 | -4551,47 |
| | 0,600 | 1,077 | -0,0003 | -10,03 | 0,4160 | 4662,86 | 0,050 | 0,00 | 0,257 | -235,10 | -4662,86 |
| | dostředný tlak | | | | | | | | | 0,00 | -5760,00 |
| | x [m] | ξ [-] | ϵ_f [-] | f_{frp} [MPa] | ω [-] | N_c [kN] | z_c [m] | N_T [kN] | z_T [m] | M_{Rk} [kNm] | N_{Rk} [kN] |



Obr. 3.57 Interakční diagram průřezu dle fib Bulletin No. 40 [4]

3.5.7 Tvar křivky interakčního diagramu při přechodu z oblasti tahového porušení na tlakové porušení

Ve všech vytvořených interakčních diagramech krátkodobé únosnosti je možné si povšimnout zlomu křivky interakčního diagramu v bodě balančního porušení x_{bal} a následného nižšího nárůstu momentové únosnosti oproti normálové v krátké vzdálenosti od bodu balančního porušení v oblasti tlakového porušení. Dle fib Bulletin No. 40 [4] je pro $x < x_{bal}$ (tahové porušení) dána únosnost průřezu vztahy

$$N = -x\alpha_{(x)}bf_{cd} + \Sigma A_f\varepsilon_{fu}E_f, \quad (3.58)$$

$$M = x\alpha_{(x)}bf_{cd}z_{c(x)} + \Sigma A_f\varepsilon_{fu}E_fz_f. \quad (3.59)$$

V těchto vztazích jsou funkcemi závislými na výšce tlačené části průřezu x součinitel α a rameno síly v tlačené části průřezu z_c . Pokud je však $x > x_{bal}$, je předpokládáno porušení průřezu drcením betonu a únosnost průřezu je dána vztahy

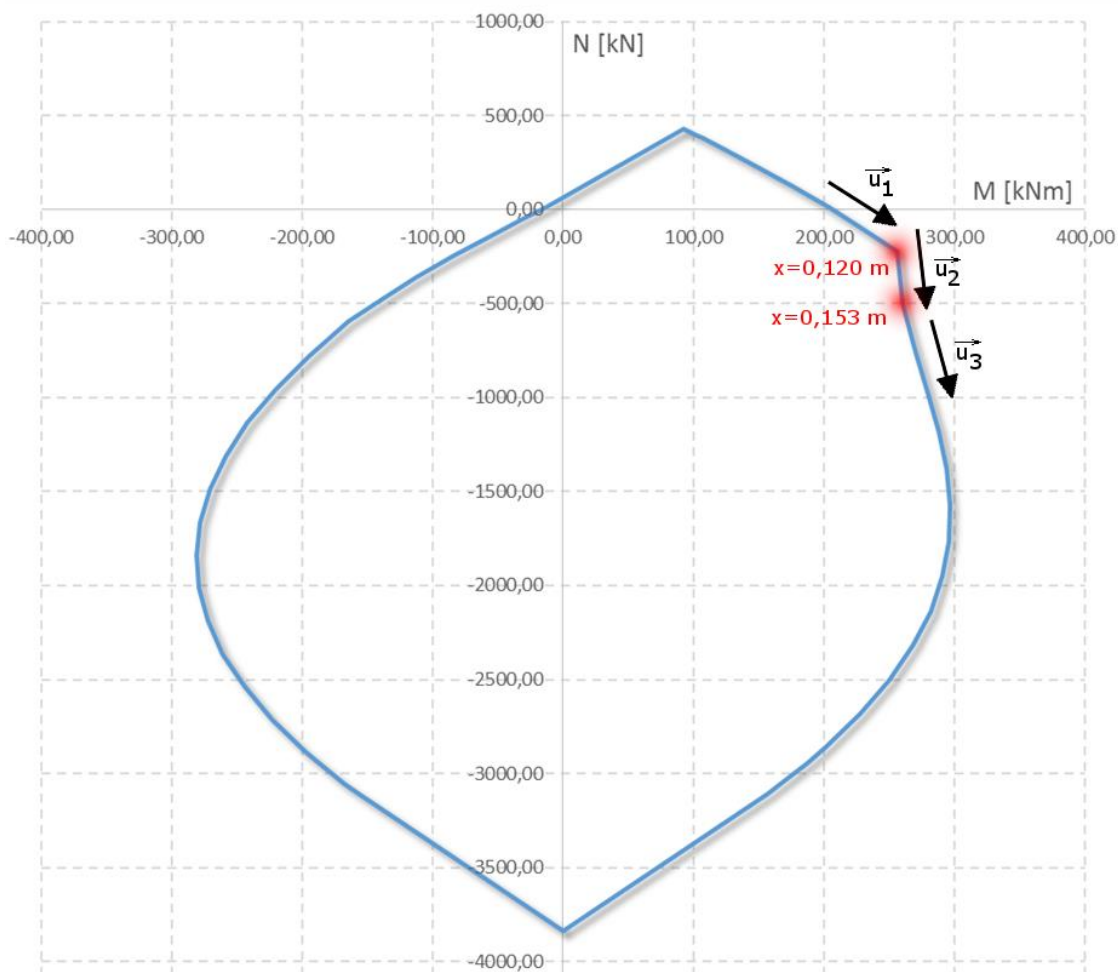
$$N = -x\alpha bf_{cd} + A_{f,1}\varepsilon_{f,1(x)}E_f, \quad (3.60)$$

$$M = x\alpha bf_{cd}z_{c(x)} + A_{f,1}\varepsilon_{f,1(x)}E_fz_{f,1}, \quad (3.61)$$

kde je na výšce tlačené části průřezu závislé rameno síly v tlačené části průřezu z_c a přetvoření tažených vrstev výztuže ε_f .

Soustava dvou rovnic (3.58 a 3.59) resp. (3.60 a 3.61) je parametrické vyjádření křivky určující interakční diagram v daných oblastech porušení. Derivací těchto rovnic lze odvodit vektory \vec{u}_1 , \vec{u}_2 a \vec{u}_3 (Obr. 3.58).

Vektory \vec{u}_1 , \vec{u}_2 a \vec{u}_3 jsou vyznačeny na obr. 3.58. Kladné hodnoty normálových sil (tahových) jsou vyneseny nad osu M, aby odpovídaly hodnotám vypočtených v kapitolách 3.5.7.1 a 3.5.7.2.



Obr. 3.58 Interakční diagram průřezu dle fib Bulletin No. 40 [4] s vyznačenými vektory

3.5.7.1 Vektor \vec{u}_1 odpovídající tahovému porušení

Jednotlivé derivace pro $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{c2}$

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dx} &= \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{3\varepsilon_c}\right) \frac{d}{dx} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3\left(\frac{x}{d-x}\varepsilon_{fu}\right)}\right) \frac{d}{dx} = \frac{\varepsilon_{c2}d}{\varepsilon_{fu}x^2} \\ \frac{dz_c}{dx} &= \left(\frac{h}{2} - \omega x\right) \frac{d}{dx} = \left(\frac{h}{2} - \left(1 - \frac{6\varepsilon_{cu2}^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4\varepsilon_{cu2}(3\varepsilon_{cu2} - \varepsilon_{c2})}\right) x\right) \frac{d}{dx} = \\ &= \frac{3\varepsilon_{c2}^2 d^2 \varepsilon_{fu}}{4(\varepsilon_{c2} + 3\varepsilon_{fu})(x(\varepsilon_{c2} + 3\varepsilon_{fu}) - \varepsilon_{c2}d)^2} - \frac{\varepsilon_{c2}^2 + 4\varepsilon_{c2}\varepsilon_{fu} + 6\varepsilon_{fu}^2}{4\varepsilon_{fu}(\varepsilon_{c2} + 3\varepsilon_{fu})} \end{aligned}$$

Celkové derivace

$$N\cdot = \left(-x \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3 \left(\frac{x}{d-x} \varepsilon_{fu} \right)} \right) b f_{cd} + \Sigma A_f \varepsilon_{fu} E_f \right) \frac{d}{dx} = - \frac{b f_{cd} (\varepsilon_{c2} + 3 \varepsilon_{fu})}{3 \varepsilon_{fu}}$$

$$M\cdot = \left(x \left(1 - \frac{\varepsilon_{c2}}{3 \left(\frac{x}{d-x} \varepsilon_{fu} \right)} \right) b f_{cd} \left(\frac{h}{2} - \left(1 - \frac{6 \left(\frac{x}{d-x} \varepsilon_{fu} \right)^2 - \varepsilon_{c2}^2}{4 \left(\frac{x}{d-x} \varepsilon_{fu} \right) \left(3 \left(\frac{x}{d-x} \varepsilon_{fu} \right) - c \right)} \right) x \right) + \Sigma A_f \varepsilon_{fu} E_f \right) \frac{d}{dx} =$$

$$= - \frac{b f_{cd} (x (\varepsilon_{c2}^2 + 4 \varepsilon_{c2} \varepsilon_{fu} + 6 \varepsilon_{fu}^2) - \varepsilon_{c2}^2 d - \varepsilon_{c2} \varepsilon_{fu} (2d + h) - 3 \varepsilon_{fu}^2 h)}{6 \varepsilon_{fu}^2}$$

pro $x = x_{bal}$

$$N\cdot = \frac{0,32 \times 20 \times 10^3 \times (0,002 + 3 \times 0,01575)}{3 \times 0,01575} = -\mathbf{6670,8995}$$

$$M\cdot = \frac{0,32 \times 20 \times 10^3 (0,12 (0,002^2 + 4 \times 0,002 \times 0,01575 + 6 \times 0,01575^2) - 0,002^2 \times 0,552 - 0,002 \times 0,01575 (2 \times 0,552 + 0,6) - 3 \times 0,01575^2 \times 0,6)}{6 \times 0,01575^2}$$

$$= \mathbf{1325,2209}$$

Velikost a směr vektoru \vec{u}_1

$$\vec{u}_1 = (N\cdot; M\cdot) = (-6670,8995; 1325,2209) = (-5,03; 1)$$

$$\cos \alpha = \frac{N\cdot}{|\vec{u}_1|} = \frac{-5,03}{\sqrt{-5,03^2 + 1^2}} \Rightarrow \alpha = 168,76^\circ$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 168,76^\circ = \mathbf{11,24^\circ}$$

3.5.7.2 Vektor \vec{u}_2 odpovídající tlakovému porušení

$$N\cdot = \left(-x \alpha b f_{cd} + A_{f,1} \left(\frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} \right) E_f \right) \frac{d}{dx} = - \frac{b f_{cd} \alpha x^2 + A_{f,1} d E_f \varepsilon_{cu}}{x^2}$$

$$M\cdot = \left(x \alpha b f_{cd} \left(\frac{h}{2} - \omega x \right) + A_{f,1} \left(\frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} \right) E_f z_{f,1} \right) \frac{d}{dx} = - \frac{4 b f_{cd} \omega \alpha x^3 - b f_{cd} h \alpha x^2 + 2 A_{f,1} d E_f \varepsilon_{cu} z_{f,1}}{2 x^2}$$

$$\frac{d \varepsilon_f}{dx} = \left(\frac{d-x}{x} \varepsilon_{cu} \right) \frac{d}{dx} = - \frac{d}{x^2} \varepsilon_{cu}$$

$$\frac{dz_c}{dx} = \left(\frac{h}{2} - \omega x \right) \frac{d}{dx} = -\omega$$

pro $x = x_{bal} = 0,120 \text{ m}$

$$N\cdot = \frac{0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,8095 \times 0,12^2 + 7,92 \times 10^{-4} \times 0,552 \times 40 \times 10^6 \times 0,0035}{0,12^2} = -\mathbf{9097,97}$$

$$M\cdot = - \frac{4 \times 0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,416 \times 0,8095 \times 0,12^3 - 0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,6 \times 0,8095 \times 0,12^2 + 2 \times 7,92 \times 10^{-4} \times 0,552 \times 40 \times 10^6 \times 0,0035 \times 0,252}{2 \times 0,12^2}$$

$$= \mathbf{28,31}$$

$$\vec{u}_2 = (N\cdot; M\cdot) = (-9097,97; 28,31) = (-321,37; 1)$$

$$\cos \alpha = \frac{N\cdot}{|\vec{u}_2|} = \frac{-321,37}{\sqrt{-321,37^2 + 1^2}} \Rightarrow \alpha = 179,82^\circ$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 179,82^\circ = \mathbf{0,18^\circ}$$

3.5.7.3 Vektor \vec{u}_3

pro $x = 0,153$ m

$$N \cdot = \frac{0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,8095 \times 0,153^2 + 7,92 \times 10^{-4} \times 0,552 \times 40 \times 10^6 \times 0,0035}{0,153^2} = -8802,44$$

$$M \cdot = \frac{4 \times 0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,416 \times 0,8095 \times 0,153^3 - 0,32 \times 20 \times 10^3 \times 0,6 \times 0,8095 \times 0,153^2 + 2 \times 7,92 \times 10^{-4} \times 0,552 \times 40 \times 10^6 \times 0,0035 \times 0,252}{2 \times 0,153^2} = 235,83$$

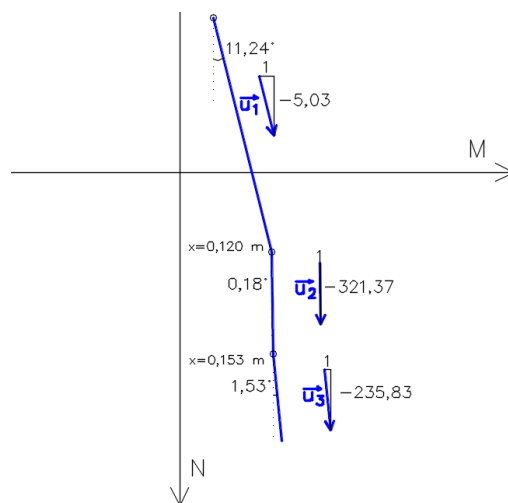
$$\vec{u}_3 = (N \cdot; M \cdot) = (-8802,44; 235,83) = (-37,46; 1)$$

$$\cos \alpha = \frac{N \cdot}{|\vec{u}_3|} = \frac{-37,46}{\sqrt{-37,46^2 + 1^2}} \Rightarrow \alpha = 178,47^\circ$$

$$\beta = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 178,47^\circ = 1,53^\circ$$

3.5.7.4 Vyhodnocení provedených výpočtů

Do obr. 3.59 jsou vektory vyneseny v měřítku, kde poměr $M:N$ odpovídá 1:1.



Obr. 3.59 Vektory určující sklon křivek interakčního diagramu

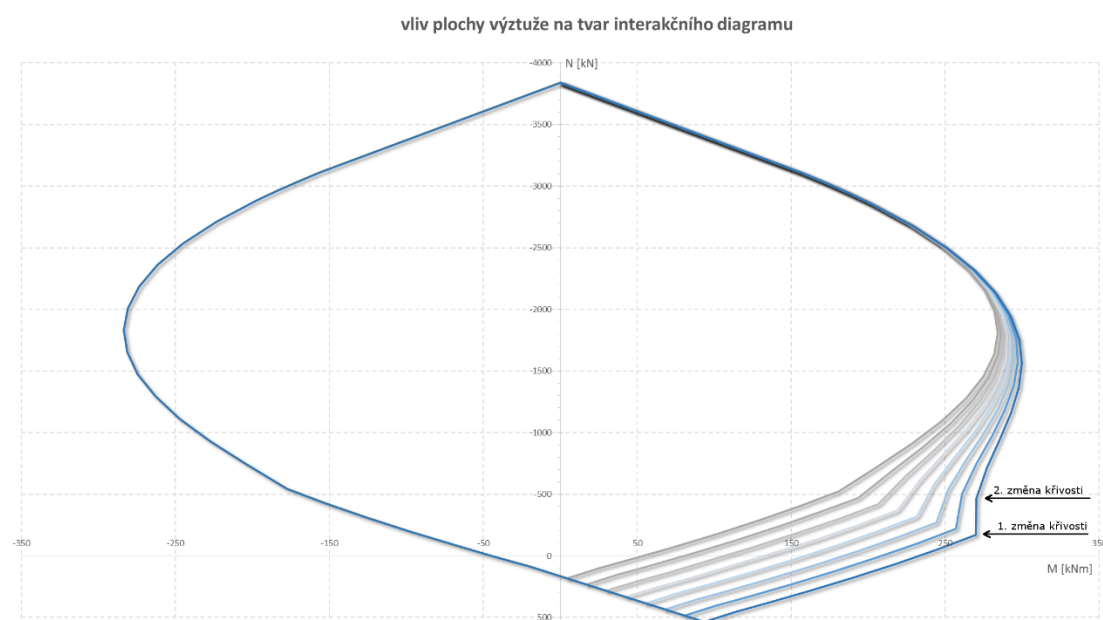
Tímto způsobem je ověřena správnost vykresleného tvaru interakčního diagramu krátkodobé únosnosti. Zlom křivky interakčního diagramu v bodě balančního porušení lze zdůvodnit dle tab. 3.17 započítáním snižování přetvoření tažené vrstvy FRP výztuže při zvyšování výšky tlačené části průřezu v oblasti tlakového porušení a s tím spojené snížení nárůstu momentové únosnosti oproti oblasti tahového porušení. Ke zlomu v tomto bodě tedy musí dojít, ale jeho velikost je ovlivněna silou v tažené FRP výztuži. Na obr. 3.60 je znázorněn vliv plochy výztuže na tvar interakčního diagramu. Podobný vliv by mělo i zvyšování únosnosti FRP výztuže v tahu. Z obr. 3.60 je patrné, že při „malé“ ploše FRP výztuže je přechod mezi oblastmi tahového a tlakového porušení téměř plynulý a se zvyšováním plochy tažené FRP výztuže začíná docházet k výraznému zlomu.

tab. 3.17 Změna velikosti sil při nárůstu výšky tlačené části průřezu

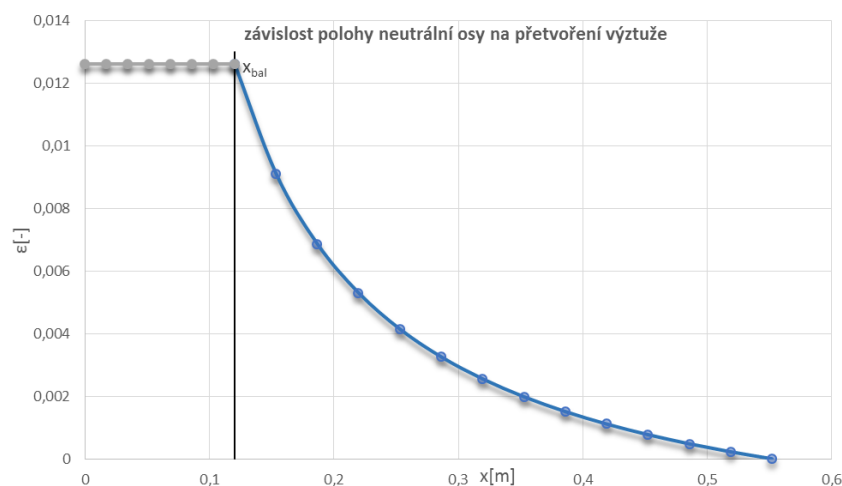
| $x < x_{bal}$ | | $x > x_{bal}$ | |
|--------------------------------|---|-----------------------------|---|
| $F_C = -x\alpha_{(x)}bf_{cd}$ | ↑ | $F_C = -x\alpha bf_{cd}$ | ↑ |
| $F_T = A_f\varepsilon_{fu}E_f$ | - | $F_T = A_f\varepsilon_fE_f$ | ↓ |

Síla v tažené FRP výztuži ovlivňuje i následný tvar interakčního diagramu v oblasti tlakového porušení. Při velké síle v tažené FRP výztuži dochází kromě změny křivosti v bodě balančního porušení i k výrazné změně křivosti opačným směrem (Obr. 3.60). Tato změna křivosti je způsobena nelineárním snižováním přetvoření tažené FRP výztuže se zvyšováním výšky tlačené části průřezu (Obr. 3.61). Přetvoření FRP výztuže se v oblasti tlakového porušení určí dle vztahu

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cu}}{x}(d - x). \quad (3.57)$$



Obr. 3.60 Vliv plochy výztuže na tvar interakčního diagramu



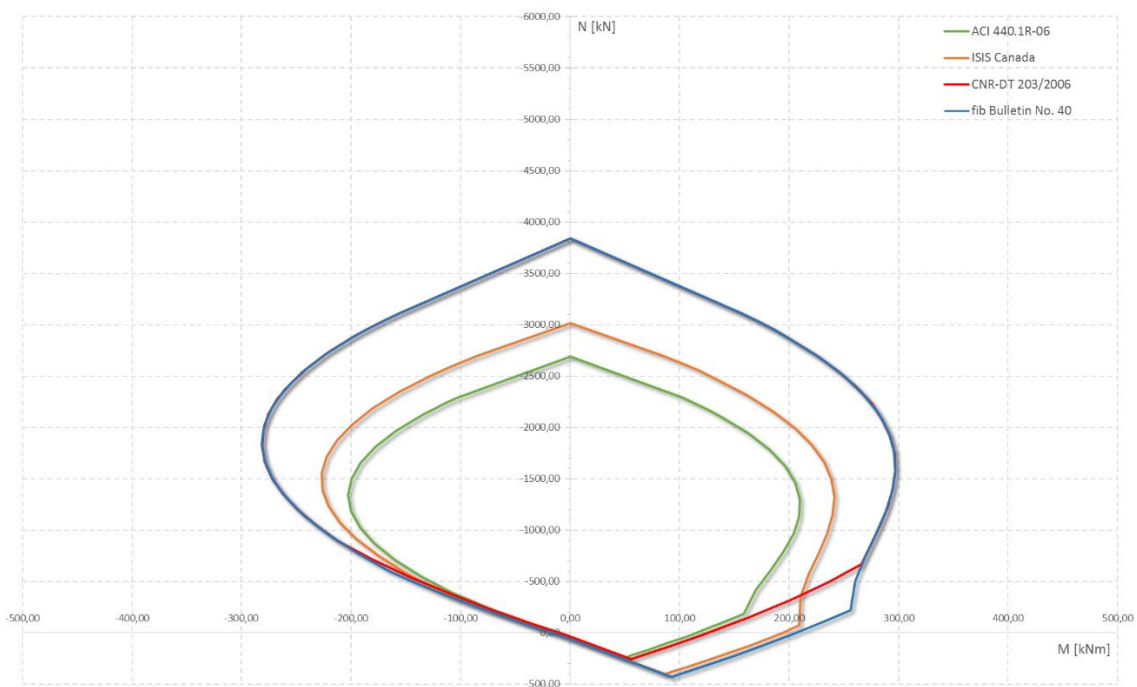
Obr. 3.61 Závislost polohy neutrální osy na přetvoření výztuže

3.5.8 Porovnání interakčních diagramů vytvořených dle jednotlivých předpisů

Interakční diagramy pro krátkodobou únosnost vytvořené dle jednotlivých předpisů nelze přímo porovnávat podle velikosti, jelikož jsou pro příslušné předpisy použity rozdílné normy pro zatížení a liší se tedy návrhová hodnota zatížení. Obr. 3.62 je tedy přiložen pouze informativně jako hrubé porovnání tvarů a velikostí jednotlivých interakčních diagramů.

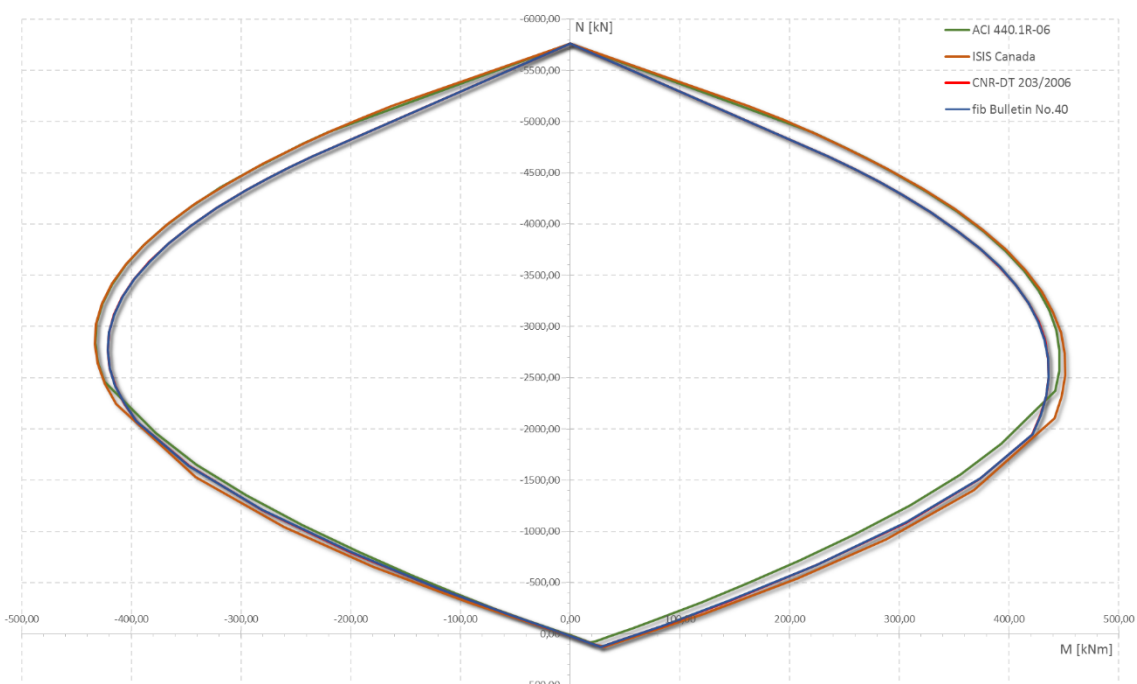
Na Obr. 3.63 je provedeno porovnání interakčních diagramů pro zamezení creepového porušení. Zde se objevují jak materiálové charakteristiky, tak i zatížení v charakteristických hodnotách. Proto lze v některých případech (viz kap. 3.5.8.1) prohlásit, že je hodnota na straně zatížení pro všechny předpisy stejná a jednoduše lze určit, který z interakčních diagramů dává největší rezervu v únosnosti.

Interakční diagram průřezu pro krátkodobou únosnost



Obr. 3.62 Interakční diagramy pro krátkodobou únosnost

Interakční diagram průřezu pro zabránění creepového porušení



Obr. 3.63 Interakční diagramy pro zamezení creepového porušení

3.5.8.1 Určení zatížení při posuzování průřezu proti creepovému porušení

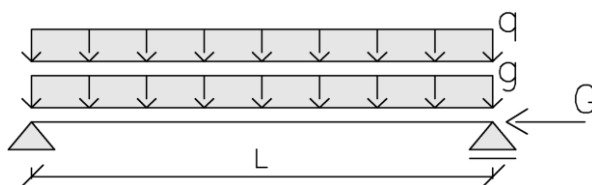
K dotvarování a případné poruše FRP výztuží dochází v případech, kdy jsou vystaveny dlouhodobě působícímu napětí o konstantní velikosti. Je tedy zřejmé, že krátkodobě působící zatížení nemá na creepové porušení vliv. Z tohoto důvodu jsou v jednotlivých předpisech definovány kombinace zatížení, při kterých nesmí napětí ve výztuži překročit danou hranici. Dle ACI 440.1R-06 [1] a ISIS Canada [2] je napětí ve výztuži určováno od všech stálých zatížení a dlouhodobě působících proměnných zatížení. Předpis CNR-DT 203/2006 [3] omezuje napětí ve výztuži od kvazistálé kombinace zatížení 6.16b [9]. Dle stejné kombinace je uvažováno návrhové zatížení i pro předpis fib Bulletin No. 40 [4].

tab. 3.18 Kombinace zatížení pro omezení napětí

| předpis | kombinace zatížení |
|----------------------|---|
| ACI 440.1R-06 | stálé + dlouhodobé proměnné zatížení (bez součinitelů) |
| ISIS Canada | |
| CNR-DT 203/2006 | kvazistálá kombinace |
| fib. Bulletin No. 40 | |

3.5.8.2 Numerické srovnání interakčních diagramů

Pro potřeby numerického srovnání jednotlivých interakčních diagramů byl zvolen jednoduchý prostý nosník (Obr. 3.64) zatížený stálým zatížením (g a G) a proměnným zatížením (q). Proměnné zatížení je uvažováno jako zatížení sněhem (krátkodobé).



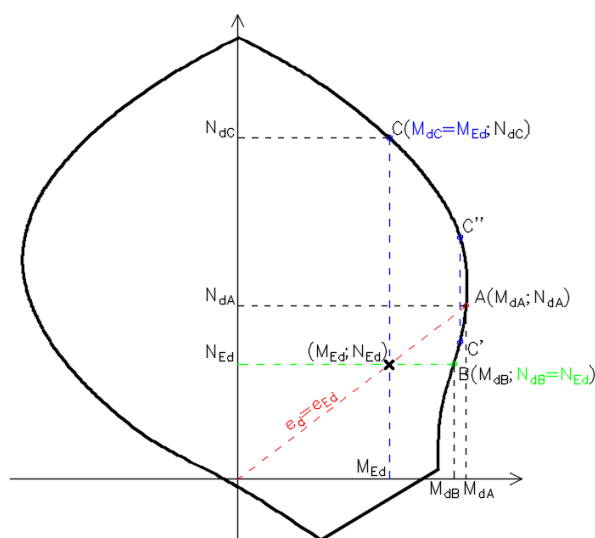
Obr. 3.64 Zatížení působící na nosník

Hodnoty zatížení jsou náhodně voleny a jejich kombinace jsou provedeny dle zásad v kap. 2.4 pro interakční diagramy krátkodobé únosnosti, resp. kap. 3.5.8.1 pro interakční diagramy pro zamezení creepového porušení. Výsledný posudek únosnosti je určován trojím způsobem (Obr. 3.65):

- Pokud z počátku souřadnic vedeme přímku procházející bodem kombinace zatížení, protne v určitém bodě křivku interakčního diagramu (bod A). Posuzována je tedy vzdálenost od počátku souřadnic. Výslednou vzdálenost lze určit

$$e = \sqrt{M^2 + N^2}. \quad (3.57)$$

- V případě, kdy se posuzuje momentová rezerva únosnosti, je normálová únosnost uvažována jako konstantní na hodnotě normálové souřadnice kombinace zatížení. Výsledný bod na hranici interakčního diagramu je bod B.
- Obdobným způsobem lze určit normálovou únosnost (bod C) při uvažování konstantní momentové únosnosti. Nutné je však určit normálovou rezervu nejen pro zvyšování normálové síly (bod C''), ale i pro její snižování (bod C').



Obr. 3.65 Posouzení rezervy únosnosti interakčního diagramu

Srovnání interakčních diagramů je provedeno v tab. 3.19. Je vytvořeno 7 různých variant zatížení a výsledné posudky únosnosti jsou provedeny dle metodiky popsané výše.

Tab. 3.19 Srovnání únosností dle jednotlivých předpisů

| | | | | | | e _d =e _{Ed} | | | N _{dB} =N _{Ed} | | M _{dC} =M _{Ed} | | | |
|------------------------|------|-----|-----|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|------|
| g | q | G | L | M _{Ed} | N _{Ed} | M _{dA} | N _{dA} | e _{Ed} /e _d | M _{dB} | M _{Ed} /M _{dB} | N _{dC} | N _{Ed} /N _{dC} | | |
| kN/m | kN/m | kN | m | kNm | kN | kNm | kN | | kNm | | kN | | | |
| zatížení | | | | | | únosnost | | posudek | únosnost | posudek | únosnost | posudek | | |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 2,0 | 0,0 | 7,1 | 94,27 | 0,00 | 115,00 | 0,00 | 0,82 | 115,00 | 0,82 | 0,00 | 0,00 |
| | ISIS | | | | | 96,09 | 0,00 | 194,50 | 0,00 | 0,49 | 194,50 | 0,49 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 102,27 | 0,00 | 126,00 | 0,00 | 0,81 | 126,00 | 0,81 | 0,00 | 0,00 |
| | fib | | | | | 102,27 | 0,00 | 208,00 | 0,00 | 0,49 | 208,00 | 0,49 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 61,75 | 0,00 | 42,00 | 0,00 | 1,47 | 42,00 | 1,47 | 0,00 | 0,00 |
| | ISIS | | | | | 61,75 | 0,00 | 65,00 | 0,00 | 0,95 | 65,00 | 0,95 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 61,75 | 0,00 | 63,00 | 0,00 | 0,98 | 63,00 | 0,98 | 0,00 | 0,00 |
| | fib | | | | | 61,75 | 0,00 | 62,00 | 0,00 | 1,00 | 62,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 5,0 | 0,0 | 7,1 | 124,51 | 0,00 | 115,00 | 0,00 | 1,08 | 115,00 | 1,08 | 0,00 | 0,00 |
| | ISIS | | | | | 124,45 | 0,00 | 194,50 | 0,00 | 0,64 | 194,50 | 0,64 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 130,62 | 0,00 | 126,00 | 0,00 | 1,04 | 126,00 | 1,04 | 0,00 | 0,00 |
| | fib | | | | | 130,62 | 0,00 | 208,00 | 0,00 | 0,63 | 208,00 | 0,63 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 61,75 | 0,00 | 42,00 | 0,00 | 1,47 | 42,00 | 1,47 | 0,00 | 0,00 |
| | ISIS | | | | | 61,75 | 0,00 | 65,00 | 0,00 | 0,95 | 65,00 | 0,95 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 61,75 | 0,00 | 63,00 | 0,00 | 0,98 | 63,00 | 0,98 | 0,00 | 0,00 |
| | fib | | | | | 61,75 | 0,00 | 62,00 | 0,00 | 1,00 | 62,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 |

| | | | | | | e _d =e _{Ed} | | | N _{dB} =N _{Ed} | | M _{dC} =M _{Ed} | | | |
|------------------------|------|-----|-----|-----------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|------|
| g | q | G | L | M _{Ed} | N _{Ed} | M _{dA} | N _{dA} | e _{Ed} /e _d | M _{dB} | M _{Ed} /M _{dB} | N _{dC} | N _{Ed} /N _{dC} | | |
| kN/m | kN/m | kN | m | kNm | kN | kNm | kN | | kNm | | kN | | | |
| zatížení | | | | | | únosnost | | posudek | únosnost | posudek | únosnost | posudek | | |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 1,2 | 100,0 | 8,5 | 123,91 | 140,00 | 157,00 | 175,00 | 0,80 | 148,00 | 0,84 | 30,00 | 0,21 |
| | ISIS | | | | | 126,89 | 140,00 | 210,00 | 225,00 | 0,61 | 209,50 | 0,61 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 135,74 | 135,00 | 166,00 | 160,00 | 0,83 | 158,50 | 0,86 | 45,00 | 0,33 |
| | fib | | | | | 135,74 | 135,00 | 257,00 | 248,00 | 0,54 | 236,50 | 0,57 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 88,51 | 100,00 | 61,00 | 70,00 | 1,44 | 68,00 | 1,30 | 180,00 | 1,80 |
| | ISIS | | | | | 88,51 | 100,00 | 98,00 | 110,00 | 0,91 | 96,00 | 0,92 | 78,00 | 0,78 |
| | CNR | | | | | 88,51 | 100,00 | 90,50 | 103,00 | 0,97 | 91,00 | 0,97 | 99,00 | 0,99 |
| | fib | | | | | 88,51 | 100,00 | 91,00 | 105,00 | 0,96 | 90,50 | 0,98 | 100,00 | 1,00 |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 1,8 | 150,0 | 9,0 | 148,23 | 210,00 | 161,00 | 232,00 | 0,91 | 160,00 | 0,93 | 145,00 | 0,69 |
| | ISIS | | | | | 151,37 | 210,00 | 210,00 | 295,00 | 0,71 | 209,50 | 0,72 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 161,29 | 202,50 | 181,00 | 230,00 | 0,88 | 175,00 | 0,92 | 145,00 | 0,72 |
| | fib | | | | | 161,29 | 202,50 | 257,00 | 325,00 | 0,62 | 252,00 | 0,64 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 99,23 | 150,00 | 70,00 | 105,00 | 1,43 | 81,00 | 1,23 | 225,00 | 1,50 |
| | ISIS | | | | | 99,23 | 150,00 | 117,00 | 175,00 | 0,85 | 110,00 | 0,90 | 112,00 | 0,75 |
| | CNR | | | | | 99,23 | 150,00 | 104,00 | 152,00 | 0,98 | 103,50 | 0,96 | 136,00 | 0,91 |
| | fib | | | | | 99,23 | 150,00 | 103,50 | 153,00 | 0,97 | 103,00 | 0,96 | 138,00 | 0,92 |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 1,8 | 200,0 | 9,5 | 165,16 | 280,00 | 162,50 | 275,00 | 1,02 | 163,00 | 1,01 | 325,00 | 1,16 |
| | ISIS | | | | | 168,65 | 280,00 | 211,00 | 355,00 | 0,79 | 210,00 | 0,80 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 179,71 | 270,00 | 195,50 | 282,00 | 0,95 | 190,00 | 0,95 | 225,00 | 0,83 |
| | fib | | | | | 179,71 | 270,00 | 259,00 | 392,00 | 0,69 | 256,00 | 0,70 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 110,56 | 200,00 | 80,00 | 145,00 | 1,38 | 94,00 | 1,18 | 270,00 | 1,35 |
| | ISIS | | | | | 110,56 | 200,00 | 133,00 | 240,00 | 0,83 | 122,50 | 0,90 | 152,00 | 0,76 |
| | CNR | | | | | 110,56 | 200,00 | 118,00 | 210,00 | 0,95 | 113,00 | 0,98 | 169,00 | 0,85 |
| | fib | | | | | 110,56 | 200,00 | 117,50 | 210,00 | 0,95 | 112,50 | 0,98 | 171,00 | 0,86 |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 1,8 | 300,0 | 10,0 | 183,00 | 420,00 | 168,00 | 390,00 | 1,08 | 170,00 | 1,08 | 610,00 | 1,45 |
| | ISIS | | | | | 186,88 | 420,00 | 215,00 | 480,00 | 0,87 | 212,50 | 0,88 | 0,00 | 0,00 |
| | CNR | | | | | 199,13 | 405,00 | 232,00 | 475,00 | 0,85 | 219,00 | 0,91 | 310,00 | 0,77 |
| | fib | | | | | 199,13 | 405,00 | 261,00 | 530,00 | 0,76 | 259,00 | 0,77 | 0,00 | 0,00 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 122,50 | 300,00 | 110,00 | 272,00 | 1,10 | 118,00 | 1,04 | 325,00 | 1,08 |
| | ISIS | | | | | 122,50 | 300,00 | 187,50 | 455,00 | 0,66 | 148,50 | 0,82 | 200,00 | 0,67 |
| | CNR | | | | | 122,50 | 300,00 | 160,00 | 390,00 | 0,77 | 140,50 | 0,87 | 230,00 | 0,77 |
| | fib | | | | | 122,50 | 300,00 | 159,50 | 389,00 | 0,77 | 140,00 | 0,88 | 230,00 | 0,77 |
| krátkodobá únosnost | ACI | 9,8 | 1,8 | -10,0 | 5,0 | 45,75 | -14,00 | 106,50 | -40,00 | 0,42 | 111,50 | 0,41 | -210,00 | 0,07 |
| | ISIS | | | | | 46,72 | -14,00 | 176,00 | -80,00 | 0,25 | 189,50 | 0,25 | -245,00 | 0,06 |
| | CNR | | | | | 49,78 | -13,50 | 116,00 | -38,00 | 0,42 | 121,50 | 0,41 | -237,00 | 0,06 |
| | fib | | | | | 49,78 | -13,50 | 193,00 | -60,00 | 0,26 | 203,00 | 0,25 | -260,00 | 0,05 |
| creepové porušení | ACI | | | | | 30,63 | -10,00 | 40,00 | -13,00 | 0,77 | 40,00 | 0,77 | -45,00 | 0,22 |
| | ISIS | | | | | 30,63 | -10,00 | 60,50 | -25,00 | 0,49 | 66,50 | 0,46 | -121,00 | 0,08 |
| | CNR | | | | | 30,63 | -10,00 | 58,00 | -22,00 | 0,52 | 63,00 | 0,49 | -121,00 | 0,08 |
| | fib | | | | | 30,63 | -10,00 | 57,50 | -22,00 | 0,52 | 62,50 | 0,49 | -120,00 | 0,08 |

3.5.8.3 Vyhodnocení numerického srovnání interakčních diagramů

Kombinace zatížení byly voleny tak, aby se blížily mezní únosnosti jednoho z interakčních diagramů. Z provedených posudků je patrné, že nejvíce omezují krátkodobou únosnost předpisy ACI 440.1R-06 [1] a CNR-DT 203/2006 [3]. Posouzení napětí v FRP výztuži na creepové porušení vychází nejméně příznivě pro ACI 440.1R-06 [1], posudky podle ostatních předpisů jsou srovnatelné.

Kapitola 4

Závěr

První část práce se zabývala zpracováním postupu výpočtu momentu na mezi únosnosti při namáhání prostým ohybem podle norem a směrnic dle zadání práce. Dílčí vztahy pro výpočet momentu byly odvozovány a byl vysvětlen jejich význam. Obsaženy jsou i další ustanovení a komentáře týkající se např. minimální plochy výztuže, přístupu k návrhu průřezu s více vrstvami výztuže apod. Pro názornost je proveden ukázkový příklad na výpočet krátkodobé únosnosti při namáhání prostým ohybem. U průřezu namáhaného posouvající silou je nejprve uvedena teorie potřebná k pochopení výpočtu smykové únosnosti. V tomto teoretickém úvodu jsou rozebrány jednotlivé složky přenosu smykového namáhání, podstata návrhu či přístup současných norem k návrhu. Dále je zpracován postup výpočtu smykové únosnosti na nosnících dle všech norem kromě fib Bulletin, v této směrnici postup výpočtu smykové únosnosti uveden není. Podle ACI 440.1R-06 je shrnut postup výpočtu únosnosti proti protlačení lokálně podepřených desek. Na závěr je proveden ukázkový příklad na výpočet smykové únosnosti. Následně byly uvedeny vlivy, které působí na FRP výztuže a ovlivňují jejich dlouhodobé vlastnosti. Postup zohlednění těchto dlouhodobých účinků při návrhu byl taktéž zpracován. Poslední částí této kapitoly byl přehled norem na výpočet zatížení, které se váží na příslušné předpisy.

Další část této práce byla zaměřena na tvorbu interakčních diagramů prvků s FRP výztuží. V první řadě byly stanoveny a popsány důležité polohy přetvoření průřezu. Pro tyto polohy průřezu byly odvozeny vztahy pro výpočet únosnosti prvku namáhaného kombinací ohybového momentu a normálové síly. Pro oblast tahového porušení byly pomocí integrace plochy pod pracovním diagramem betonu v tlaku analyticky odvozeny součinitele pro výpočet síly v tlačené části průřezu a její polohy v závislosti na dosaženém přetvoření krajních tlačných vláken průřezu. Omezení únosnosti při dostředném tlaku si vyžádalo tuto problematiku nastudovat v normách pro betonové konstrukce příslušných států. Následně byly vytvořeny interakční diagramy pro všechny normy a směrnice ze zadání pro krátkodobou únosnost i pro zamezení creepového porušení. Velká pozornost byla věnována oblasti v okolí přechodu mezi tahovým a tlakovým porušením. Křivka interakčního diagramu má v této části na první pohled nezvyklý tvar. Správnost tohoto tvaru však byla ověřena matematicky pomocí tečen vedených k interakčnímu diagramu v jednotlivých oblastech porušení. Následně byl i nalezen důvod, kterým je nelineární pokles přetvoření tažené FRP výztuže vzhledem k nárůstu výšky tlačené části průřezu. Únosnosti vytvořených interakčních diagramů poté byly porovnány. Jako nejméně ekonomická pro návrh na dlouhodobou únosnost se jeví norma ACI 440.1R-06.

Na teoretickou část diplomové práce navázala výpočtová. V této části byl proveden návrh prefabrikované vrátnice skládající se ze čtyř dílů. Dle zadání vedoucího práce byl proveden návrh středního dílu a jednoho krajního dílu, který je opatřen dveřním

otvorem. Tato konstrukce byla vypracována ve variantách s obyčejným i lehkým betonem. Každá varianta byla navržena jednak s FRP výztuží a jednak s klasickou ocelovou výztuží, aby bylo porovnáno množství použitého materiálu u jednotlivých variant. Porovnání je provedeno v technické zprávě statického výpočtu. Z tohoto porovnání vyplývá, že je objem výztuže u variant s FRP výztuží menší. U variant s lehkým betonem nedošlo k dalšímu snížení objemu výztuže, protože bylo snížení množství výztuže limitováno konstrukčními zásadami. Výkresy výztuže byly vytvořeny pro variantu s obyčejným betonem.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ACI 440-1R-06: *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2007. 44 s.
- [2] Design Manual No. 3: *Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers*. Winnipeg: ISIS Canada, 2006. 150 s.
- [3] Technical Document CNR-DT 203/2006: *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Rome: ITA, 2007. 39 s.
- [4] fib Bulletin No. 40: *FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007. 147 s.
- [5] ACI 318-05: *Building code requirements for structural concrete and commentary*. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2005. 430 s.
- [6] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 210 s.
- [7] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004. 76 s.
- [8] ASCE/SEI 7-10: *Minimum design loads for buildings and other structures*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2013. 633 s.
- [9] NBCC 2010: *National building code of Canada, 2010*. Ottawa, Ont.: National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, 2010. 1167 s.
- [10] CSA A23.3-04: *Design of Concrete Structures, 2004*. Mississauga, Ont: Canadian Standards Association, 2004. 240 s.
- [11] Model Code 2010: *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn, 2013. 434 s.

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|-----------------------|--|
| C_E | je redukční součinitel lišící se v závislosti na typu použitých vláken a okolním prostředí, |
| f_{fu}^* | je zaručená pevnost v tahu definovaná dle vztahu, |
| $f_{u,ave}$ | je střední hodnota pevnosti vzorků v tahu, |
| σ | je směrodatná odchylka, |
| ε_{fu}^* | je zaručené mezní přetvoření, které je definováno vztahem, |
| $\varepsilon_{u,ave}$ | je střední hodnota mezního přetvoření vzorků, |
| f_{fb} | je návrhová pevnost FRP výztuže v tahu za ohybu, |
| r_b | je poloměr ohybu, |
| d_b | je průměr výztužného prutu, |
| ϕ | je redukční faktor ohybové únosnosti, |
| b | je šířka průřezu, |
| d | je účinná výška průřezu, |
| β_1 | je součinitel upravující výšku náhradního obdélníkového rozdělení napětí v závislosti na třídě betonu, |
| c | je vzdálenost neutrální osy od tlačného okraje průřezu, |
| f_c' | je zaručená pevnost betonu v tlaku, |
| ε_{cu} | je mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku, |
| ε_f | je přetvoření FRP výztuže, |
| z | je rameno vnitřních sil, |
| c_b | je výška tlačné části průřezu při balančním způsobu porušení, |
| $A_{f,min}^*$ | je minimální plocha výztuže v jednotkách Angloamerické měrné soustavy, |
| $f_c'^*$ | je pevnost betonu v tlaku v jednotkách Angloamerické měrné soustavy, |
| f_{fu}^* | je pevnost FRP výztuží v tahu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy, |
| b_w^* | je účinná šířka průřezu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy, |
| d^* | je účinná výška průřezu v jednotkách Angloamerické měrné soustavy, |

- C je síla v tlačené části průřezu,
- T je tahová síla v FRP výztuži,
- α_1 je poměr průměrného napětí v obdélníkovém rozložení napětí k pevnosti,
- β_1 je poměr výšky obdélníkového rozložení napětí ke vzdálenosti neutrální osy od tlačného okraje průřezu
- ϕ_c je redukční součinitel pevnosti betonu,
- ϕ_{frp} je redukční součinitel pevnosti FRP výztuže,
- A_{frpb} je plocha FRP výztuže při balančním stupni vyztužení,
- E_{frp} je modul pružnosti FRP výztuže,
- f_{frpu} je pevnost FRP výztuže v tahu,
- I_t moment setrvačnosti neporušené části průřezu k těžišťové ose,
- y_t vzdálenost těžiště neporušené části k taženému okraji,
- A_c je plocha betonu,
- n_{frp} je pracovní součinitel,
- E_c je modul pružnosti betonu,
- η_a je součinitel zohledňující vliv prostředí (vlhkosti),
- γ_f je součinitel spolehlivosti FRP výztuže,
- M_{cr} je moment na mezi vzniku trhlin,
- f_{ck} je charakteristická pevnost betonu v tlaku,
- f_{fk} je charakteristická pevnost FRP výztuže v tahu,
- x je vzdálenost neutrální osy od krajních tlačných vláken průřezu,
- η je součinitel tlakové pevnosti betonu,
- λ je součinitel definující efektivní výšku tlačné oblasti betonu,
- f_{cd} je návrhová válcová pevnost betonu v tlaku,
- α_{cc} je součinitel uvažující dlouhodobé účinky na tlakovou pevnost betonu,
- γ_c je součinitel spolehlivosti betonu,

- ζ je poměrná výška tlačené oblasti betonu,
- f_{ctm} je pevnost betonu v tahu,
- A_f je plocha podélné FRP výztuže,
- A_s je plocha podélné ocelové výztuže,
- f_{fw} je napětí ve smykové FRP výztuži,
- E_{fw} je modul pružnosti FRP výztuže,
- V_c^* je smyková únosnost betonu v Angloamerické měrné soustavě jednotek,
- f_c^{**} je pevnost betonu v tlaku v Angloamerické měrné soustavě jednotek,
- f_{fv} je napětí ve smykové FRP výztuži,
- s je podélná vzdálenost třmínků,
- V_u je návrhová hodnota posouvající síly,
- l_{frpd} je kotevní délka,
- θ je úhel odklonu třmínku vzhledem k podélné těžišťové ose,
- σ_v je maximální přípustné napětí v FRP výztuži,
- ε_v je maximální přípustné návrhové přetvoření výztuže,
- σ_N je normálové napětí v podélné výztuži,
- V_{ser} je posouvající síla ve výztuži při provozním zatížení,
- V_c je smyková únosnost betonu,
- $V_{Rd,ct}$ je příspěvek betonu ke smykové únosnosti průřezu,
- $V_{Rd,max}$ je únosnost tlačného segmentu mezi trhlinami,
- τ_{Rd} je návrhové smykové napětí,
- $\gamma_{f,\phi}$ je redukční součinitel,
- $f_{fk1000h}$ je pevnost FRP výztuží v tahu v čase 1000 hodin,
- f_{fk0} je krátkodobá pevnost FRP výztuží v tahu,
- R_{10} je standardní redukce pevnosti za dekádu logaritmického času,
- ζ je redukční součinitel pro nepříznivá stálá zatížení G,

| | |
|---------------------|---|
| P | značí zatížení předpětím, |
| $Q_{k,l}$ | značí charakteristickou hodnotu hlavního proměnného zatížení, |
| ψ | je kombinační součinitel, |
| $d_{l,2}$ | je vzdálenost těžiště horní vrstvy výztuže od tlačeného okraje průřezu, |
| ε_{c2} | je přetvoření při dosažení pevnosti betonu v tlaku, |
| ε_{cu2} | je limitní přetvoření betonu v tlaku, |
| α | je součinitel převádějící rozdělení napětí v tlačené části průřezu na rovnoměrné, |
| S | je moment setrvačnosti, |
| A | je plocha pod pracovním diagramem, |
| ε_{cc} | je přetvoření betonu v úrovni těžiště tlačené části průřezu, |
| ε_0 | je přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí v betonu, |
| P_0 | je normálová únosnost průřezu při nulové excentricitě, |
| A_g | je celková plocha průřezu, |
| A_{st} | je plocha ocelové výztuže, |
| f_y | je mez kluzu ocelové výztuže. |

Seznam příloh

- B1) Použité podklady
- B2) Statický výpočet – I. část
- B3) Statický výpočet – II. část
- B4) Přílohy statického výpočtu
- B5) Výkresová dokumentace
- B6) Technická zpráva